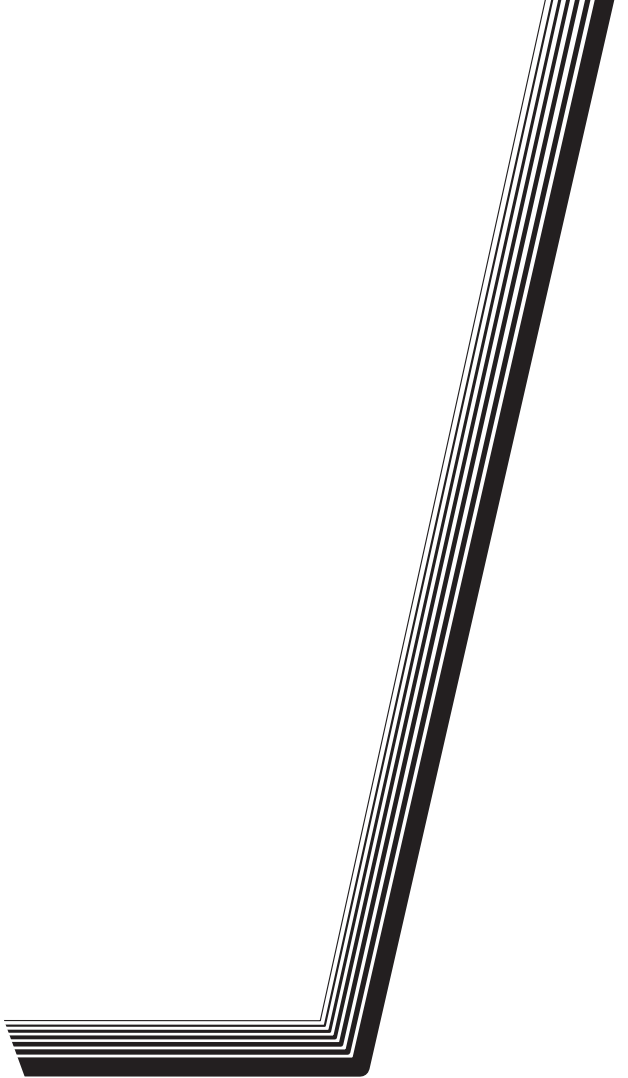


ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 4(50)

Красноярск 2013

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 4(50)

Главный редактор

Ковалев Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора

Логинов Юрий Юрьевич, доктор физико-
математических наук, профессор

Сенашов Сергей Иванович, доктор физико-
математических наук, профессор

Мурыгин Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь

Зеленков Павел Викторович, кандидат технических
наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин Сергей Степанович, доктор физико-
математических наук, профессор

Головенкин Евгений Николаевич, доктор
технических наук, профессор

Ерыгин Юрий Владимирович, доктор экономических
наук, профессор

Лаптенко Валерий Дмитриевич, доктор технических
наук, профессор

Ловчиков Анатолий Николаевич, доктор
технических наук, профессор

Медведев Александр Васильевич, доктор
технических наук, профессор

Михеев Анатолий Егорович, доктор технических
наук, профессор

Москвичев Владимир Викторович, доктор
технических наук, профессор

Сафонов Константин Владимирович, доктор
физико-математических наук, доцент

Смирнов Николай Анатольевич, доктор технических
наук, профессор

Сомов Виктор Григорьевич, доктор технических
наук, доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев Станислав Николаевич, академик РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Дегерменджи Андрей Георгиевич, академик РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Дегтерев Александр Степанович, доктор
технических наук, профессор

Колмыков Владимир Афанасьевич, кандидат
технических наук, профессор

Миронов Валерий Леонидович, член-корреспондент
РАН, доктор физико-математических наук, профессор

Тестоедов Николай Алексеевич, член-
корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор

Шабанов Василий Филиппович, академик РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Шайдунов Владимир Викторович, член-
корреспондент РАН, доктор физико-математических
наук, профессор

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ) – межрегиональный научный журнал, содержащий результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, а также экономики.

Представленные в журнал статьи публикуются после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru)

Периодичность – 4 раза в год
Специальный выпуск – 1 раз в год

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>)

и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

Журнал включен в каталоги:

русской прессы «Роспечать» (МАП) – 11399;
объединенный «Пресса России» – 39263

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, проспект имени газеты
«Красноярский рабочий», 31, П-415
Тел./ факс (391)291-90-19
E-mail: vestnik@sibsau.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-22189 от 27.10.2005 г.

Журнал включен ВАК России в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна

Учредитель

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Редактор: О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста: С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка: Л. В. ЗВОНАРЕВОЙ

Подписано в печать 25.12.2013. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 32,0.

Уч.-изд. л. 40,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/193. С 193/13.

Редакционно-издательский отдел

Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.

660014, г. Красноярск,

просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Отпечатано ООО РПБ «Амальгама».

660061, г. Красноярск, ул. Калинина, 53



Уважаемые коллеги!

Мне очень приятно представить вам юбилейный – 50 том Вестника Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева.

Первый номер был выпущен в 2000 году. На протяжении 13 лет журнал остается основным научным периодическим изданием нашего университета, а в области авиационной и ракетно-космической техники – одним из ведущих изданий, занимающих лидирующие позиции среди российских научных журналов. На страницах Вестника публикуются результаты научных исследований ученых СибГАУ и красноярских вузов, ведущих специалистов предприятий региона – ОАО «Красмаш», ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва, ЦКБ «Геофизика» и др. Кроме того, журнал постоянно расширяет свою географию и сотрудничает с авторами из Московского авиационного института, Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (г. Новосибирск), ФГУП «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина» (г. Химки), ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» (г. Королев), Института космической техники и технологий (г. Алматы), университета г. Ульма (Германия) и др.

Журнал развивается и совершенствуется. В 2012 году Вестник СибГАУ получил диплом I степени как лучшее периодическое издание на III Сибирском региональном конкурсе «Университетская книга». В этом году журнал был включен в Международную реферативную базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker. Идет активная подготовка к включению издания в реферативную базу данных SCOPUS издательства Elsevier. Вступление в международные реферативные базы позволит сделать журнал еще более узнаваемым в международном научном сообществе.

Однако неизменной остается тематическая направленность журнала и его основная задача – отражение результатов развития авиационной и ракетно-космической отрасли России.

Хотелось бы поздравить с юбилейным выпуском всех, кто работает над Вестником, публикует в нем свои статьи, а также тех, кто его читает. Отдельно бы хотелось поблагодарить за многолетний труд многоуважаемых членов редакционного совета и редакционной коллегии журнала. Мы вместе делаем наш журнал!

*Главный редактор
И. В. Ковалев*

РАЗДЕЛ
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА



УДК 004.932

АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПОСТРОЕНИИ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

В. В. Буряченко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: buryachenko@sibsau.ru

Рассмотрены этапы алгоритма стабилизации видеопоследовательности. Предложен алгоритм построения нечеткой модели для оценки достоверности локальных векторов движения. Представлен алгоритм низкочастотной фильтрации с адаптивной подстройкой фактора стабилизации для расчета сглаживающего вектора. Выполнена оценка качества работы алгоритма стабилизации в сравнении с другими известными системами.

Ключевые слова: стабилизация видео, оценка движения, метод соответствия блоков, нечеткая модель, коррекция движения.

A VIDEO STABILIZATION ALGORITHM BASED ON THE CONSTRUCTION OF A FUZZY MOTION MODEL

V. V. Buryachenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: buryachenko@sibsau.ru

In the paper the technique for the motion estimation is presented. An algorithm for the construction of a fuzzy model to evaluate the reliability of the local motion vectors is proposed. An algorithm for the low-pass filtering with an adaptive tuning stabilizing factor for the calculation of the smoothing vector is described. Experimental results have indicated a good performance of the proposed digital video stabilization algorithm in comparison with other systems.

Keywords: video stabilization, motion estimation, block-matching methods, fuzzy model, motion correction.

В последнее десятилетие методы стабилизации видеопоследовательностей широко используются для того, чтобы устранять нежелательные вибрации, которые часто встречаются в непрофессиональных домашних видео, сделанных ручными видеокамерами. Такие видеопоследовательности часто содержат эффекты тряски и страдают от нежелательного дрожания. Поэтому стабилизация видеопоследовательностей часто используется, чтобы улучшить качество, что позволяет получить стабильные фрагменты видео, снятого даже в неоптимальных условиях. Лучшие методы стабилизации используют механические инструменты, которые физически устраняют тряску камеры, или используют оптические или электронные устройства для влияния на сенсор камеры при получении кадра [1]. С другой стороны, для применения методов цифровой стабилизации видео не нужно никаких дополнительных знаний о физическом движении камеры, поэтому такие подходы не являются дорогостоящими, так как они могут быть легко внедрены как в режиме реального времени, так и для постобработки уже имеющихся данных.

Большое число работ посвящено исследованию особенностей методов, основанных на методах соответствия блоков [2–5]: они используют различные фильтры для уточнения оценки движения и расчета локальных векторов движения. Эти алгоритмы обычно позволяют получить хорошие результаты, но могут давать ошибочные результаты для видеопоследова-

тельностей, содержащих большие движущиеся объекты. Это происходит потому, что они не привязывают дескриптор к блоку и не ведут отслеживание движения объектов на последовательности кадров [6].

Качество оценки движения в методах, основанных на поиске локальных векторов, можно повысить несколькими способами. Предлагается использовать для расчета параметров преобразования кадра только достоверные вектора, которые описывают именно движение камеры, но не объектов в кадре [7; 8]. Для расчета глобального вектора движения применяется двумерная линейная модель, учитывающая аффинные преобразования. При оценке нежелательного движения применяется низкочастотный фильтр, позволяющий отделить дрожание камеры от преднамеренного движения, например панорамирования. Для подбора сглаживающего параметра предложен алгоритм, учитывающий интенсивность движения на видеопоследовательности. Общая схема предлагаемого алгоритма стабилизации представлена на рис. 1.

Блочная оценка движения. Схема блочной оценки движения содержит следующую последовательность действий. Изображение делится на неперекрывающиеся блоки пикселей, значение интенсивности которых определяется как $I_n(x, y)$, где x, y – координаты пикселя, n – номер кадра. Для каждого блока в небольшой окрестности $-Sx < dx < +Sx$ и $-Sy < dy < +Sy$ ищутся наиболее похожие блоки на следующем кадре $I_{n+1}(x+dx, y+dy)$.

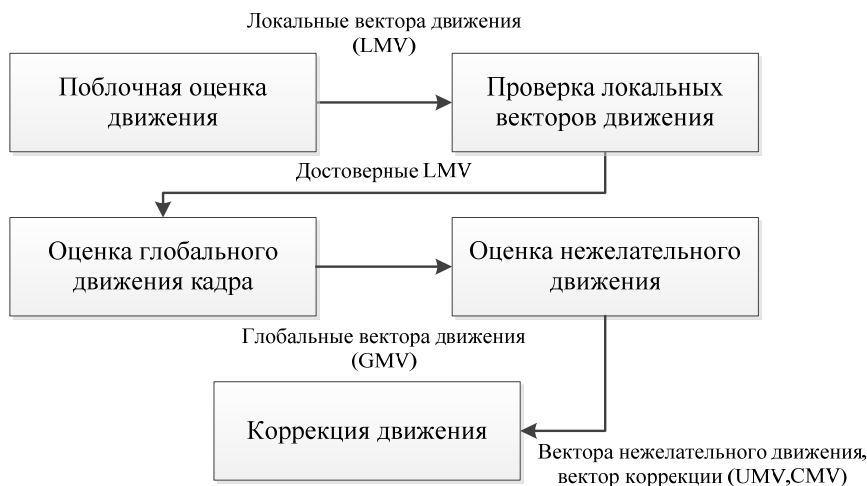


Рис. 1. Схема алгоритма стабилизации видеопоследовательности

Сходство блоков определяется минимизацией функции ошибки e , в соответствии с используемой метрикой [8]. Обычно применяются три метрики: сумма абсолютных разностей (SAD), сумма квадратичных отклонений (SSD) и среднее значение квадратов разностей (MSD):

$$SAD(d_x, d_y) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N |I_{n+1}(x, y) - I_n(x + d_x, y + d_y)|, \quad (1)$$

$$SSD(d_x, d_y) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I_{n+1}(x, y) - I_n(x + d_x, y + d_y))^2, \quad (2)$$

$$MSD(d_x, d_y) = \frac{1}{B_{num} \times B_{num}} \times \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (I_{n+1}(x, y) - I_n(x + d_x, y + d_y))^2, \quad (3)$$

где B_{num} – количество анализируемых блоков.

Результатом данного этапа являются рассчитанные для каждого блока изображения локальные векторы движения (LMV).

Исключение ложных локальных векторов движения. После нахождения локальных векторов движения требуется определить, описывают ли они движение камеры либо некоторых объектов в кадре. Для этого строится нечеткая модель, аналогичная описанной в работе [7], на выходе которой определяется мера достоверности векторов движения. Для каждого локального вектора движения рассчитывается мера ошибки двумя способами: евклидово расстояние (величина вектора) $E' = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, где $1-n$ – номер вектора; угол наклона вектора относительно горизонта $C' = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. Производится расчет средней ошибки M_E – *median error*. Для каждого элемента E' , C' выполняется расчет ошибки отклонения:

$$d_i^e = e_i / M_E, \quad d_i^c = c_i / M_C, \quad (4)$$

где M_E и M_C – медианные значения E' и C' соответственно.

Для улучшения оценки движения применяются сигмоидальные функции принадлежности, что позволяет более точно отделить движение объектов в кадре

от смещения камеры. При непрофессиональной съемке на видеопоследовательностях часто возникают шумы различного вида, которые ухудшают возможность оценки движения и последующей стабилизации. Поэтому предложено использовать различные параметры для незашумленных и зашумленных видеопоследовательностей.

Ошибка отклонения d^i подается на вход функции принадлежности, её значение отображается на различных классах точности: высокий, средний, низкий. Более низкие значения погрешности отображаются на лучшем классе, высокие значения погрешности – на худшем [8]. Строятся сигмоидальные функции принадлежности, представлено выражение для расчета значений лучшего класса:

$$f(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a, \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2}, \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b, \\ 0, & x \geq b. \end{cases} \quad (5)$$

Рекомендуется использовать значения $a = 0,5$ и $b = 1,5$ для описания класса «высокий» незашумленных видеопоследовательностей и $a = 0,75$ и $b = 1,75$ для зашумленных видеопоследовательностей (рис. 2).

Применяется модель нечеткого вывода Такаги–Сугено–Канга [9], чтобы определить качество вектора. Модель нечеткого вывода TSK достаточно проста, так как она является компактным и вычислительно эффективным представлением, которое может быть реализовано с использованием адаптивных методов для построения нечетких моделей. Представлены четыре различных нечетких набора: *отличный*, *хороший*, *средний*, *плохой* (рис. 3).

Каждому из четырех классов соответствует константа: (1, 0.75, 0.5, 0) для незашумленных и (1, 0.85, 0.65, 0) – для зашумленных видеопоследовательностей. Выходное значение определяется на основе обоих входных данных в соответствии с минимальным значением.

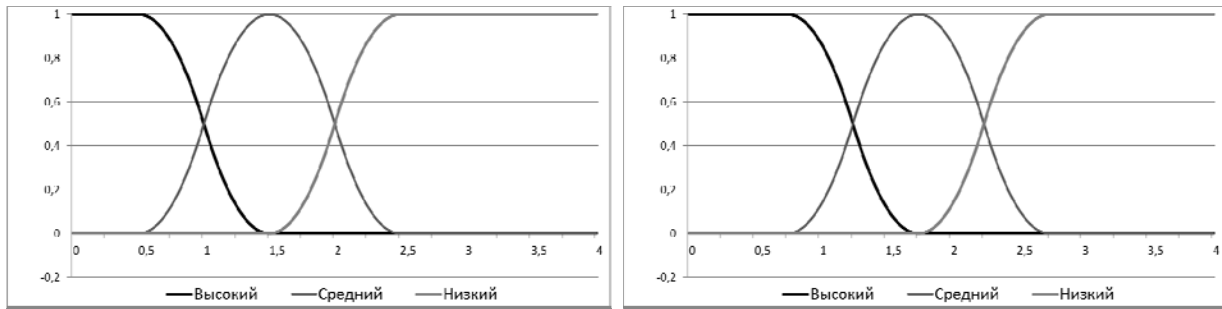


Рис. 2. Сигмоидальные нечеткие функции принадлежности для незашумленных и зашумленных видеопоследовательностей

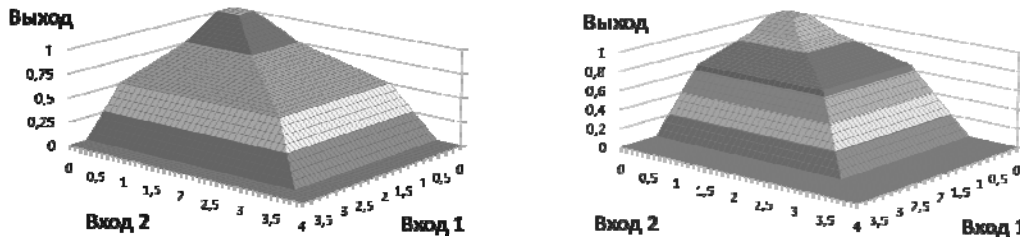


Рис. 3. Нечеткие модели поверхностей, отображающих две входные функции и одну выходную для незашумленных и зашумленных видеопоследовательностей

Результат нечеткой модели – это мера правдоподобия вектора движения, которая находится в диапазоне $[0; 1]$. Настраивая параметры функции принадлежности, можно регулировать, каким образом значения ошибки E влияют на выходное значение правдоподобия вектора. Когда вычислены меры правдоподобия векторов, выбираются только лучшие 60 % значений, которые передаются на вход метода для расчета параметров стабилизации движения.

Расчет вектора глобального движения кадра. Глобальное движение между соседними кадрами можно оценить при помощи двумерной линейной модели, которая представляет собой хороший компромисс между точностью и вычислительной сложностью. Эта модель описывает межкадровое движение с помощью четырех различных параметров, а именно: два направления движения, угол поворота и коэффициент увеличения, которые связывают координаты точки (X_i, Y_i) в кадре с точкой (X_f, Y_f) в следующем кадре преобразованием

$$\begin{cases} x_f = x_i \lambda \cos \theta - y_i \lambda \sin \theta + T_x, \\ y_f = x_i \lambda \sin \theta + y_i \lambda \cos \theta + T_y, \end{cases} \quad (6)$$

где λ – параметр увеличения; θ – угол поворота; T_x, T_y – модули вектора движения по направлениям x , y соответственно.

Поскольку векторы движения, полученные с фона изображения, должны быть очень похожи по величине и направлению, используется механизм кластеризации для классификации поля движения на два кластера, соответствующих фону и переднему плану изображения [4]. Глобальное движение, вызванное движением камеры, оценивается в процессе кластеризации, состоящем из двух этапов:

1. Построение гистограммы H , содержащей достоверные локальные векторы движения (*Valid LMV*). Значение $H_{(x,y)}$ увеличивается на единицу каждый раз, когда встречается локальный вектор с соответствующими координатами $LMV(x, y)$.

2. Выбор значения глобального вектора движения. За исключением случая, когда в сцене преобладает крупный движущийся объект, блок кластера, соответствующий фону изображения, имеет максимальное количество голосов. Максимальное значение этого кластера выбирается в качестве глобального вектора движения (*GMV*).

Оценка нежелательного движения. Рассчитанный вектор глобального движения кадра может состоять из двух основных компонент: намеренное движение (например, панорамирование камеры) и непреднамеренное движение. Качественный алгоритм коррекции должен удалять только нежелательное движение, при этом не затрагивая преднамеренное движение камеры.

Предполагая, что нежелательное движение соответствует высокочастотной компоненте, предлагаемый алгоритм использует фильтр низких частот, чтобы удалить нежелательные компоненты движения. Сглаживающий вектор движения (*SMV*) получен путем фильтрации, которая сохраняет преднамеренное движение камеры.

Предлагаемый метод вычисляет *SMV* в виде регрессии первого порядка по формуле

$$SMV_{(k)} = \alpha \times SMV_{(k-1)} + (1 - \alpha) \times GMV_{(k)}, \quad (7)$$

где k – номер кадра; $0 \leq \alpha \leq 1$ – варьируемый параметр.

Фильтр первого порядка может быть использован в системах реального времени, его применение требует мало памяти. При этом сглаживание движения

будет удовлетворять визуально при выборе подходящего значения α . Параметр α можно рассматривать как фактор сглаживания: больший коэффициент сглаживания приводит к плавному движению, но большей задержке при преднамеренном движении камеры. Предложена адаптивная подстройка параметра α , основанная на величине глобального смещения камеры на предыдущих тридцати кадрах, рассчитанной по формуле

$$GDiff_{(k)} = \sum_{i=k-30}^k |GLV_i + GLV_{i-1}|, \quad (8)$$

где k – номер кадра; GLV_k – вектор глобального движения кадра k .

Значение коэффициента α выбирается по формуле

$$\alpha_{(k)} = \begin{cases} \frac{GDiff_k}{GLV_{\max}} \times \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}, & \text{если } GDiff_k < GLV_{\max}, \\ \alpha_{\max}, & \text{если } GDiff_k > GLV_{\max}, \end{cases} \quad (9)$$

где $GLV_{\max}$ – максимальное значение, принимаемое глобальным вектором движения кадра; $\alpha_{\max}$, $\alpha_{\min}$ – максимальное и минимальное значения параметра $\alpha_{\max} = 0,98$, $\alpha_{\min} = 0,5$, выбранные опытным путем.

На рис. 4 представлен график, показывающий уровень исходного движения анализируемой видеопоследовательности и рассчитанный при адаптивной подстройке параметра α сглаживающий вектор (SMV_k).

Коррекция движения. После расчета фактора сглаживания α , сглаживающий вектор SMV_k вычисляется

по формуле (7). Вычисление значения вектора нежелательного движения (UMV_k) производится по формуле

$$UMV_k = GMV_k - SMV_k. \quad (10)$$

Для восстановления текущего кадра к его стабилизированному положению требуется изменить его позицию на вектор накопленного нежелательного движения (AMV_k), рассчитываемой по формуле (11), поскольку стабилизированное положение кадра определяется на основании предыдущих кадров, которые учитываются с последней смены сцены:

$$AMV_k = \sum_{i=m}^k UMV_i, \quad (11)$$

где m – номер первого кадра с момента последнего изменения сцены.

Экспериментальные результаты. Тестирование разработанного алгоритма проводилось на 15 стандартных видеопоследовательностях [10], приведены результаты оценки качества стабилизации для видеопоследовательностей, полученных с различными условиями съемки (рис. 5):

- движение камеры со значительными проективными преобразованиями в сцене, а также наличием неконтрастного фона (рис. 5, а);
- движение камеры вперед с резким вертикальным и горизонтальным смещением (рис. 5, б);
- резкое движение камеры по различным направлениям с поворотом, увеличением; наличие крупного объекта интереса в центре кадра (рис. 5, в).

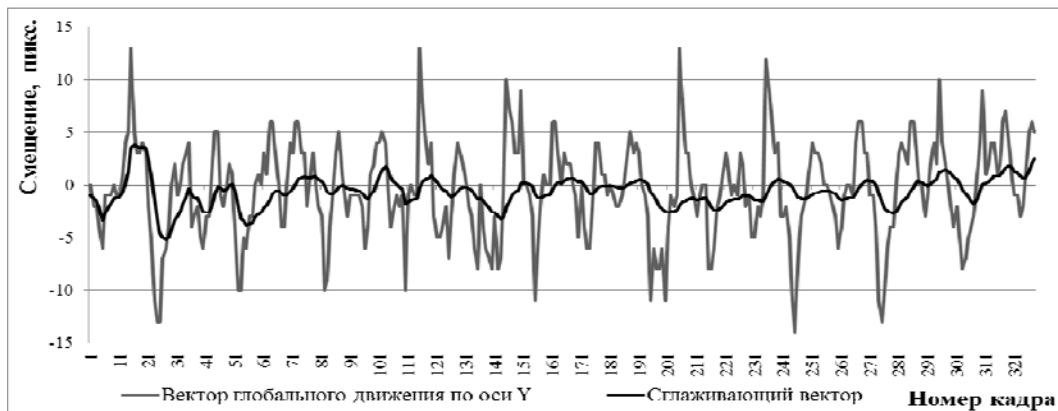


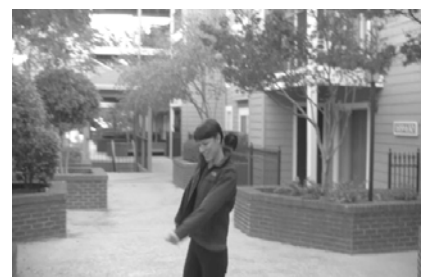
Рис. 4. График расчета сглаживающего вектора для видеопоследовательности *gleicher.avi*



а



б



в

Рис. 5. Различные виды движения на видеопоследовательностях:
а – *gleicher4.avi*; б – *new_gleicher.avi*; в – *sam_1.avi*

Объективная оценка качества стабилизации видеопоследовательности выполняется с использованием метрики: пиковое отношение сигнала к шуму (*PSNR*) как меры ошибки. *PSNR* между кадрами k и $k-1$ определяется по формулам

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N [I_k(x, y) - I_{k-1}(x, y)]^2, \quad (12)$$

$$PSNR(k) = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{\max}^2}{MSE(k)} \right), \quad (13)$$

где $MSE(k)$ – это среднеквадратичная межкадровая ошибка; $I_{\max}$ – максимальное значение интенсивности пикселя; M, N – размеры кадра.

Значение *PSNR* показывает, насколько одно изображение похоже на другое, что полезно для оценки качества стабилизации простым сравнением соседних

кадров [8]. Качество межкадрового преобразования *Interframe Transformation Fidelity* – (*ITF*) используется для объективной оценки эффективности алгоритма стабилизации: стабилизированная видеопоследовательность должна иметь более высокое значение *ITF*, чем оригинальная:

$$ITF = \frac{1}{N_{Frame}} \sum_{k=0}^{N_{Frame}} PSNR(k), \quad (14)$$

где N_{Frame} – количество кадров видеопоследовательности.

В таблице приведены результаты оценки качества стабилизации *ITF*, рассчитанной с применением метрики *PSNR*, для представленных на рис. 5 видеопоследовательностей.

Оценка качества стабилизации видеопоследовательностей

Название	Оригинальное значение <i>ITF</i> , дБ	Стабилизированное значение <i>ITF</i> без применения модели ТСК, дБ	Стабилизированное значение <i>ITF</i> с применением нечеткой модели ТСК, дБ
SANY0025_xvid.avi	20,53892	21,09076	23,79189
lf_juggle.avi	24,30286	24,37177	28,06012
akiyo.avi	35,92952	39,14661	39,53257
Butovo_synthetic.avi	22,26415	27,19789	27,20789
EllenPage_Juggling.avi	24,65855	25,23049	28,58255
road_cars_krasnoyarsk.avi	22,70482	22,80707	25,91258
Cars.avi	14,67391	15,88153	19,49475
Gleicher4.avi	19,29703	19,50634	23,18371
Sam_1.avi	19,09737	19,28141	22,20112
cat_orig.avi	25,07131	26,47094	28,14086
Gleicher1.avi	18,86996	19,48223	22,78846
Gleicher2.avi	19,91954	20,36718	24,56673
gleicher3.avi	16,55214	16,71899	20,12285
new_gleicher.avi	17,28921	17,81638	21,70575
yuna_long_original.avi	17,84131	18,94389	21,46971

Для видеопоследовательностей статических сцен оценка движения с применением нечеткой модели ТСК более точно отражает глобальное движение кадра, поскольку не учитывается движение объектов переднего плана. Для видеопоследовательностей, содержащих большое количество мелких объектов (*butovo_synthetic.avi*; *lf_juggle.avi*) алгоритм оценки движения с применением модели ТСК показывает наилучшие результаты: увеличение значения *ITF* в среднем на 3 дБ. При стабилизации динамических сцен алгоритм оценки движения позволяет избежать влияние крупных движущихся объектов переднего плана, присутствующих на видеопоследовательностях *EllenPage_Juggling.avi*, *Sam_1.avi*, *gleicher3.avi*.

В зависимости от типов движения, присутствующих на видеопоследовательности, достигаются различные результаты стабилизации. Для *new_gleicher.avi*, где присутствует увеличение изображения, связанное с перемещением изображения по направлению движения камеры, алгоритм расчета достоверных векторов движения практически не даёт прироста значению *ITF*. Наоборот, для видеопоследовательности *gleicher4.avi*, в которой алгоритм нахождения локальных векторов движе-

ния дает сбой в связи с неконтрастным фоном, занимающим большую часть изображения, алгоритм исключения ложных векторов обеспечивает улучшение стабилизации видеопоследовательности. Таким образом, достигается цель повышения качества стабилизации сложных статических и динамических сцен, поскольку для расчета вектора коррекции используются только достоверные векторы движения.

Библиографические ссылки

1. Jang S., Pomplun M., Kim G., Choi H. Adaptive robust estimation of affine parameters from block motion vectors, *Image and Vision Computing*, 2005. P. 1250–1263.
2. Ko-Cheung H., Wan-Chi S. Extended analysis of motion-compensated frame difference for block-based motion prediction error // *Image Processing and Transactions on*. 2007. Vol. 16.
3. Acharjee S., Chaudhuri S. S. Fuzzy Logic Based Three Step Search Algorithm for Motion Vector Estimation // *Int. J. Image, Graphics and Signal Processing*. 2012. № 2. P. 37–43.

4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ Петербург, 2005. 736 с.
5. Фаворская М. Н., Пахирка А. И., Шилов А. С., Дамов М. В. Методы поиска движения в видеопоследовательностях // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 1 (22). Ч. 2. С. 69–73.
6. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Video Stabilization of Static Scenes Based on Robust Detectors and Fuzzy Logic // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. Vol. 254: Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. 2013. P. 11–20.
7. Tanakian M., Rezaei M., Mohanna F. Digital Video Stabilization System by Adaptive Fuzzy Filtering // 19th European Signal Processing Conf. 2011. P. 166–168.
8. Буряченко В. В. Стабилизация видео для статичной сцены на базе модифицированного метода соответствия блоков // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 3 (43). С. 10–15.
9. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control Elsevier // Science Inc., 1985. P. 645–661.
10. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths /IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011.
11. motion vectors, *Image and Vision Computing*, 2005, p. 1250–1263.
12. Ko-Cheung H., Wan-Chi S. Extended analysis of motion-compensated frame difference for block-based motion prediction error, *IEEE Transactions on*, vol. 16, 2007.
13. Acharjee S., Chaudhuri S. S. Fuzzy Logic Based Three Step Search Algorithm for Motion Vector Estimation. *Int.J. Image, Graphics and Signal Processing*, no 2, 2012, p. 37–43.
14. Leonenkov A. V. *BXV St. Petersburg*. 2005, p. 736.
15. Favorskaya M. N., Pahirka A. I., Shilov A. S., Damov M. V. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 1 (22), p. 69–73.
16. Favorskaya M. N., V. V. Buryachenko Video Stabilization of Static Scenes Based on Robust Detectors and Fuzzy Logic *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2013, p. 11–20.
17. Tanakian M., Rezaei M., Mohanna F., Digital Video Stabilization System by Adaptive Fuzzy Filtering *EUSIPCO 2001*, 2011, p. 166–168.
18. Buryachenko V. V. *Vestnik SibGAU*. 2012, no (3), p. 10–15.
19. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control Elsevier *Science Inc.*, New York, 1985.
20. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Path, *CVPR*, 2011.

References

1. Jang S.-W., Pomplun M., Kim G., Choi H. Adaptive robust estimation of affine parameters from block

© Буряченко В. В., 2013

УДК 537.32

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44. E-mail: ven@icm.krasn.ru

Рассматривается процесс теплопередачи в обычной системе теплоотвода и термоэлектрической системе охлаждения. Проведены расчеты характеристик процесса. Получены зависимости эффективности охлаждения от интегральных параметров теплоотводящей системы, тепловой мощности радиоэлемента, нагрузочных характеристик и энергопотребления термоэлектрического модуля. Установлено, что при заданных значениях тепловой мощности радиоэлемента и термического сопротивления теплоотводящей системы существует оптимальное значение силы тока питания термоэлектрического модуля, при котором эффективность охлаждения является максимальной.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, тепловой режим радиоэлементов, система охлаждения.

THE ANALYSIS OF THERMOELECTRIC MODULE EFFICIENCY IN THE COOLING SYSTEMS

E. N. Vasilyev, V. A. Derevyanko

Institute of Computational Modeling Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation. E-mail: ven@icm.krasn.ru

A heat transfer process in the usual system of the heat sink and the thermoelectric cooling system are considered. The calculations of the process characteristics are carried out. The dependences of the cooling efficiency on integral

parameters of the heat-removing system, radio electronic component thermal power, load characteristics and energy consumption of the thermoelectric module are received. It is established that at preset values of thermal power of a radioelement and thermal resistance of the heat-removing system there is an optimum value of the module current at which efficiency of cooling is maximum.

Keywords: thermoelectric module, heat regime of radio electronic components, cooling system.

В современной электронике все острее становится проблема обеспечения оптимальных температурных режимов. Увеличение мощности радиоэлементов и степени интеграции полупроводниковых элементов в микросхемах приводит к увеличению плотности тепловых потоков и уменьшению размеров кристаллов. В результате в кристалле резко возрастает общий уровень тепловыделения, с которым традиционные методы теплоотвода уже не всегда справляются. В настоящее время для повышения интенсивности охлаждения мощных радиоэлементов и микросхем в системах теплоотвода активно применяются термоэлектрические модули (ТЭМ). Применение ТЭМ наделяет теплоотводящую систему функцией охлаждения, т. е. дает возможность достигать температуры элемента ниже значения окружающей среды. Термоэлектрические системы охлаждения обладают рядом достоинств по сравнению с другими системами охлаждения, а именно: высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, компактностью и небольшим весом, малой инерционностью, бесшумностью работы. В то же время эффективность работы ТЭМ в теплоотводящей системе зависит от многих факторов. Процессы, происходящие в термоэлектрических устройствах, характеризуются нелинейной зависимостью тепловых и электрических явлений от режима электропитания, параметров теплоотводящей системы, температуры и других условий окружающей среды. Цель данной работы заключается в анализе зависимости эффективности термоэлектрической системы охлаждения от этих факторов.

Обычная теплоотводящая система в общем виде имеет наиболее простую схему (рис. 1, а). Интегральным параметром, характеризующим эффективность теплопередачи в такой системе, является величина термического сопротивления R , определяющая температуру радиоэлемента в зависимости от его мощности тепловыделения Q :

$$T = T_0 + RQ, \quad (1)$$

где T , T_0 – значения температуры радиоэлемента и окружающей среды. Величина R определяется типом теплоотводящей системы.

Самым простым вариантом теплоотводящей системы является крепление радиоэлемента на плате, стенке металлического основания или корпуса прибора (рис. 2, а). Термическое сопротивление в этом случае определяется конфигурацией системы, теплопроводностью материала, толщиной стенки и другими параметрами. Оценим диапазон величины R для данной системы из расчета теплопередачи только за счет теплопроводного механизма в L-образной пластине 2, к которой прикреплен на высоте h тепловыделяющий элемент 1 (рис. 2, а). Расчеты проведены на основе

численного решения двумерного уравнения теплопроводности при следующих параметрах: размеры вертикальной части пластины составляют $100 \times 100 \text{ мм}^2$, горизонтальной части (основания) – $100 \times 20 \text{ мм}^2$, толщина 1 мм, коэффициент теплопроводности материала – $200 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, мощность тепловыделения элемента $Q = 10 \text{ Вт}$ на площадке $20 \times 20 \text{ мм}^2$, термическое сопротивление теплового стыка (заполнен пастой) между основанием пластины и посадочным местом задано $\approx 0,03 \text{ К/Вт}$, температура посадочного места $T_0 = 20^\circ \text{C}$. На рис. 2, б приведено распределение температурного поля при значении $h = 50 \text{ мм}$, температурный шаг между изолиниями равен 2°C , штриховыми линиями обозначены габариты посадочной площадки элемента и граница между вертикальной частью и основанием пластины. Максимальное значение температуры под элементом равно $T_{\max} = 54,4^\circ \text{C}$, в данном случае величина термического сопротивления теплоотводящей системы $R = (T_{\max} - T_0)/Q = 3,44 \text{ К/Вт}$. Очевидно, что увеличение h приводит к повышению R ($R = 5,03 \text{ К/Вт}$ при $h = 80 \text{ мм}$) и, наоборот, R снижается при уменьшении h ($R = 1,91 \text{ К/Вт}$ при $h = 20 \text{ мм}$). Изменение коэффициента теплопроводности материала и толщины пластины также приводит к пропорциональному изменению R . Из результатов расчета следует, что для данного варианта теплоотводящей системы при типичных толщинах пластины ($\approx 1 \text{ мм}$) сложно добиться значений $R < 1 \text{ К/Вт}$. Замена металлических пластин гипертеплопроводящими основаниями (ГТПО) позволяет существенно снизить величину R . ГТПО, по сути являющиеся плоскими тепловыми трубами, обладают эффективной теплопроводностью в несколько десятков раз большей, чем теплопроводность алюминия [1; 2]. При установке радиоэлемента на ГТПО возможно снижение суммарной величины R (с учетом тепловых контактов) до значения $\approx 0,1 \text{ К/Вт}$.

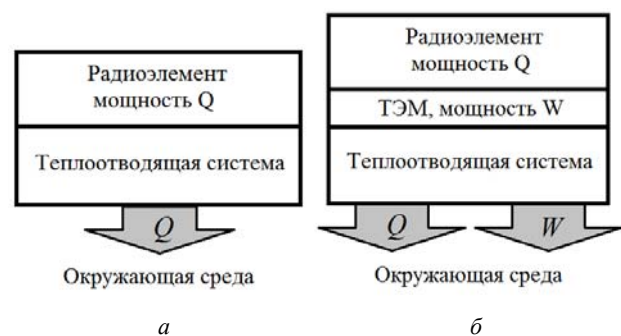


Рис. 1. Схема обычной системы теплоотвода (а); термоэлектрической системы охлаждения (б)

Термическое сопротивление современных воздушных систем теплоотвода (кулеров) для компью-

терных процессоров значительно ниже, обычно они имеют значение $R = 0,3\text{--}0,7$ К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают $R = 0,1$ К/Вт. Жидкостные теплоотводящие системы имеют еще более высокую эффективность, но при этом они являются более сложными и габаритными устройствами, по этой причине возможность их применения существенно ограничена.

Термическое сопротивление современных воздушных систем теплоотвода (кулеров) для компьютерных процессоров значительно ниже, обычно они имеют значение $R = 0,3\text{--}0,7$ К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают $R = 0,1$ К/Вт. Жидкостные теплоотводящие системы имеют еще более высокую эффективность, но при этом они являются более сложными и габаритными устройствами, по этой причине возможность их применения существенно ограничена.

На эффективность термоэлектрической системы охлаждения помимо величины термического сопротивления значительное влияние оказывают рабочие характеристики и режим работы ТЭМ. В такой системе температура радиоэлемента определяется следующей зависимостью:

$$T = T_0 + RQ + RW - \Delta T_{\text{ТЭМ}}, \quad (2)$$

где W – электрическая мощность, потребляемая ТЭМ, $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ – разность температуры между холодным и горячим спаями модуля, обусловленная эффектом Пельтье, при передаче тепловой мощности Q при заданной силе тока электропитания. В формуле (2) два последних слагаемых определяют влияние ТЭМ на температуру радиоэлемента. Охлаждение радиоэлемента обеспечивается за счет разницы температуры

$\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ на спаях ТЭМ, а слагаемое RW , наоборот, приводит к дополнительному температурному перепаду на термическом сопротивлении R системы теплоотвода при передаче тепловой мощности, выделяемой самим модулем. В итоге именно от взаимного соотношения величины этих слагаемых зависит эффективность работы термоэлектрической системы охлаждения. Следует также отметить, что в термоэлектрической системе охлаждения между радиоэлементом и теплоотводящей системой появляется дополнительный тепловой контакт, что приводит к определенному увеличению общего термического сопротивления R .

Анализ режимов системы охлаждения проводился на основе исследования зависимости температуры радиоэлемента от силы тока I , потребляемой ТЭМ, и мощности Q при различных значениях термического сопротивления R . В общем случае выбор модели ТЭМ определяется тепловой мощностью, габаритами и требованиями к температурному режиму эксплуатации радиоэлемента. При проведении расчетов были использованы характеристики серийных ТЭМ «РЕ-287-10-15» (производитель ОАО «НПП ТФП «ОС-ТЕРМ СПб», г. Санкт-Петербург [3]) с параметрами: максимальный ток и напряжение $I_{\text{max}} = 3,4$ А, $U_{\text{max}} = 35,5$ В, его максимальная холодопроизводительность при нулевой разнице температур $Q = 75$ Вт, перепад температуры $\Delta T_{\text{ТЭМ}} = 74$ °С при $Q = 0$. Следует также учитывать, что нагрузочные характеристики ТЭМ приведены при температуре горячего спая 25 °С для условий вакуума, в сухой воздушной среде показатели модуля будут ниже примерно на 5 %, в случае конденсации влаги в объеме ТЭМ снижение будет более значительным.

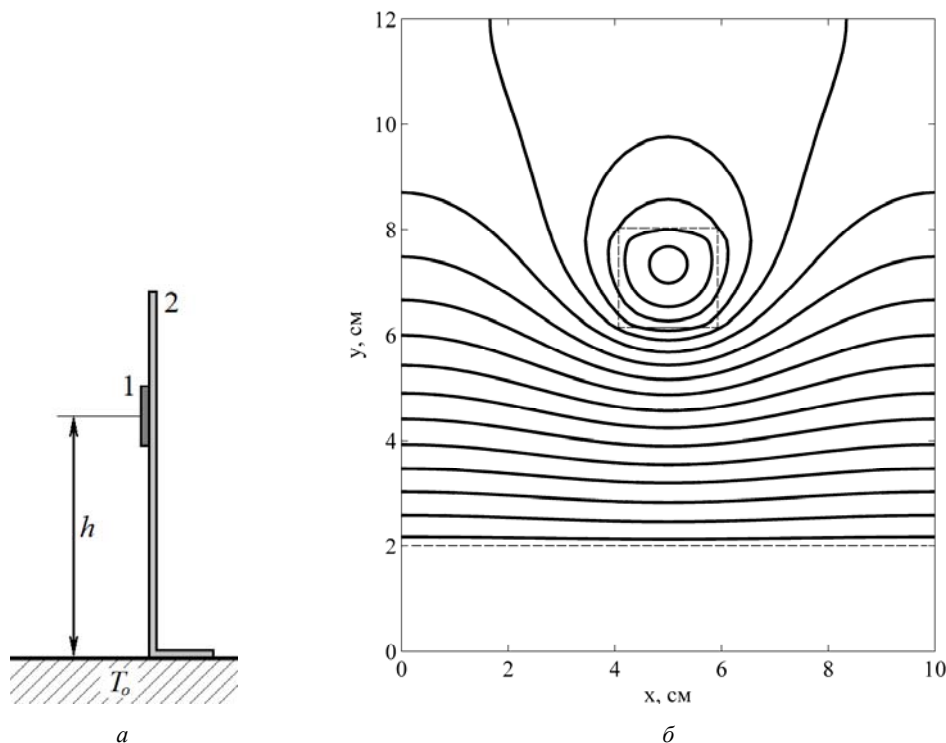
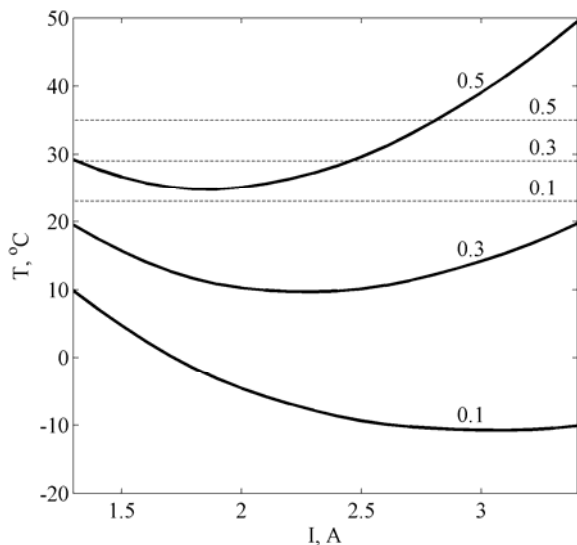
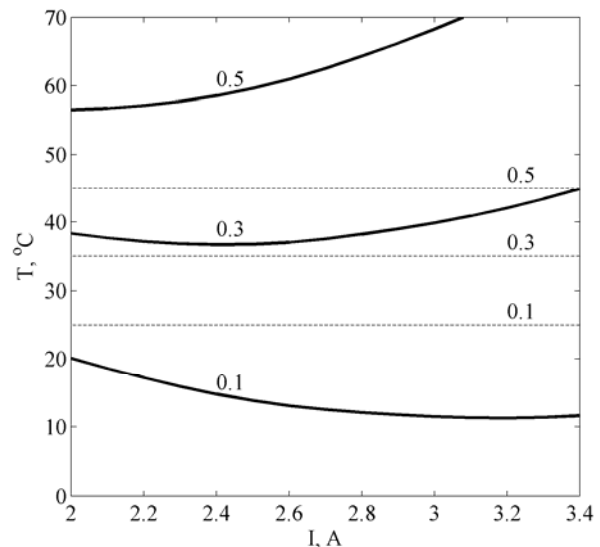


Рис. 2. Конструкция обычной системы теплоотвода (а) и температурное поле в обычной системе теплоотвода (б)

Рис. 3. Зависимости $T(I)$ при значении $Q = 30$ ВтРис. 4. Зависимости $T(I)$ при значении $Q = 50$ Вт

При разработке и эксплуатации термоэлектрической системы охлаждения важным вопросом является выбор оптимального рабочего режима. Управление режимами работы модуля осуществляется путем изменения силы тока (или напряжения) электропитания. Обычно производители рекомендуют номинальный режим работы ТЭМ при значении силы тока, равном $(0,75 \div 0,8)I_{\max}$. Однако в общем случае эффективность использования ТЭМ зависит также от тепловой нагрузки и параметров системы теплоотвода. Рассмотрим влияние силы тока I на эффективность охлаждения при заданных значениях мощности радиоэлемента Q и термического сопротивления R . На рис. 3 сплошными линиями приведены зависимости температуры радиоэлемента $T(I)$ для трех значений термического сопротивления $R = 0,1, 0,3$ и $0,5$ К/Вт при значении $Q = 30$ Вт. Штриховыми линиями на рисунке отмечены температурные уровни для обычной системы теплоотвода (без ТЭМ), рассчитанные по формуле (1) для таких же значений R . Минимумы на кривых $T(I)$ соответствуют режимам с максимальной эффективностью системы охлаждения, при которых достигается наименьшая температура радиоэлемента. С ростом величины R положение минимумов зависимостей $T(I)$ смещается в область меньших значений силы тока. При значениях $R = 0,1$ и $0,3$ К/Вт термоэлектрическая система охлаждения позволяет получить более низкие значения температуры, чем обычная система теплоотвода во всем диапазоне значений I . Для $R = 0,5$ К/Вт использование ТЭМ при значениях силы тока $I < 2,8$ А также позволяет снизить температуру элемента. При более высоких значениях тока ($I > 2,8$ А) термоэлектрическая система, наоборот, приводит к росту температуры радиоэлемента. Это объясняется тем, что собственное тепловыделение модуля W дает на термическом сопротивлении R дополнительный перепад температуры больший, чем величина $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$, обусловленная термоэлектрическим эффектом Пельтье. С увеличением мощности тепловыделения элемента диапазон эффективных режимов

термоэлектрической системы охлаждения сужается. Зависимости $T(I)$ для $Q = 50$ Вт приведены на рис. 4. Из анализа относительного расположения кривых $T(I)$ для термоэлектрической системы и уровней обычной системы теплоотвода следует, что применение ТЭМ обеспечивает охлаждение элемента только при $R = 0,1$ К/Вт, при значениях $R = 0,3$ и $0,5$ К/Вт температура элемента становится выше во всем диапазоне значений I . В данном случае общее снижение эффективности термоэлектрической системы охлаждения обусловлено уменьшением величины $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ при увеличении холодопроизводительности модуля, соответствующему повышению тепловыделения радиоэлемента.

Из проведенного сравнительного анализа режимов работы термоэлектрической системы охлаждения можно сделать следующие выводы:

1. Возможности использования ТЭМ для охлаждения теплонагруженных элементов следует рассматривать не изолированно, основываясь только на нагрузочных характеристиках, а в рамках всей системы охлаждения в целом с учетом параметров системы теплоотвода и суммарной тепловой нагрузки, включающей в себя тепловую мощность охлаждаемого радиоэлемента и энергопотребление ТЭМ.

2. Термоэлектрическая система охлаждения позволяет снижать температуру радиоэлемента в ограниченных диапазонах значений Q и R . Каждому набору Q и R из этих диапазонов соответствует оптимальное значение силы тока питания ТЭМ, при котором эффективность охлаждения является максимальной.

Эффективность использования ТЭМ снижается при увеличении тепловой мощности элемента Q и термического сопротивления системы теплоотвода R .

Библиографические ссылки

1. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко,

В. Е. Косенко и др. // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. Вып. 6. С. 19–28.

2. Васильев Е. Н., Никифорова Е. С. Математическое моделирование теплового режима гипертеплопроводного радиатора мощного радиоэлемента // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 23–26.

3. ОСТЕРМ СПб. Термоэлектрические охлаждающие модули [Электронный ресурс]. URL: <http://osterm.ru>.

References

1. Vasilyev E. N., Derevyanko V. A., Kosenko V. E. et al. *Computational Technologies*, 2009. vol. 14, no. 6, p. 19–28.

2. Vasilyev E. N., Nikiforova E. S. *Vestnik SibGAU*. 2005, no. 6, p. 23–26.

3. OSTERM SPB. Thermoelectric cooling modules. Available at: <http://osterm.ru>.

© Васильев Е. Н., Деревянко В. А., 2013

УДК 57.08+519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА ЖИВЫХ КЛЕТОК В МНОГОЭЛЕКТРОДНОМ УСТРОЙСТВЕ*

В. В. Денисенко¹, С. С. Замай², А. С. Замай²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок 50/44. E-mail: denisen@icm.krasn.ru

²Красноярский государственный медицинский университет имени проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого

Российская Федерация, 660022, Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

E-mail: sergey-zamay@yandex.ru

Построена математическая модель микроустройства, предназначенного для концентрирования живых клеток в малом объеме жидкости с помощью электрофореза. Рассчитаны пространственные распределения электрического поля в цилиндрическом жидком проводнике с осесимметричными электродами. Поля представлены на рисунках с помощью эквипотенциалей, силовых линий и линий уровня квадрата напряженности электрического поля. Клетки рассмотрены как шары из хорошего проводника, окруженные тонкими диэлектрическими мембранами. При больших частотах приложенного электрического поля мембраны становятся проницаемыми для тока смещения, и клетки ведут себя как хорошо проводящие шары. Они поляризуются, и возникают силы, втягивающие их в области сильного поля. Построены траектории движения клеток, обусловленные этой силой и вязкостью жидкости. Выявлены особенности распределения электрического поля в этом устройстве, которые возникают в окрестностях линий, разделяющих электроды и изоляторы, образующие стенки сосуда. Проанализированы факторы, лимитирующие эффективность работы устройства.

Ключевые слова: математическая модель, электрофорез, клетка.

MATHEMATICAL SIMULATION OF ELECTROPHORESIS OF LIVE CELLS BY MULTIELECTRODE DEVICE

V. V. Denisenko¹, S. S. Zamay², A. S. Zamay²

¹Institute of Computational Modelling RAS SB

50/44, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation. E-mail: denisen@icm.krasn.ru

²Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V. F. Voino-Yasenetsky

1, Partizana Zheleznyaka str., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

E-mail: sergey-zamay@yandex.ru

A mathematical model of the microchip that concentrates live cells in a small volume of liquid by electrophoresis is created. Space distributions of electric field are calculated for a cylindrical conductor with axially symmetrical electrodes. Equipotentials, field lines and lines of constant electric field strength squared are plotted. Cells are simulated as good conducted balls bounded with a low conducting membrane. The membrane has no influence on electric current if the frequency of the electric field is high enough. Then a cell behaves as a good conducting ball. It is polarized and a force appears which pulls the cell into the regions with the strong electric field. Trajectories of the cells are defined for

* Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.512.11.0086 Минобрнауки РФ.

the cell movement that is the result of this force and viscosity of the liquid. Singularities of the electric field distributions are found near the lines which separate boundary isolators and electrodes. The factors which limit effectiveness of the microchip are analyzed.

Keywords: mathematical model, electrophoresis, cell.

Электрофорезом называется электромеханическое явление перемещения частиц дисперсной фазы в жидкой или газообразной среде под действием внешнего электрического поля. Электрофорез может быть применен для концентрирования живых клеток в малой части того объема жидкости, в котором клетки располагались до начала процесса. Такое концентрирование используется, например, для выделения малого количества раковых клеток из крови с целью диагностики ранней стадии заболевания. Работа одного из современных микроскопических устройств такого рода описана в статье [1].

В настоящей работе мы представляем нашу математическую модель основных физических процессов, определяющих работу этого устройства, и результаты вычислительных экспериментов, показывающие пути повышения его эффективности.

Живая клетка, находящаяся в жидкости, по которой течет электрический ток, может быть приближенно рассмотрена как проводящий шар, окруженный тонкой мембраной, являющейся изолятором. При достаточно больших частотах внешнего электрического поля, создающего этот ток, мембрана становится проницаемой за счет тока смещения, и клетка ведет себя как хороший проводник, если, конечно, проводимость окружающей жидкости мала. Отметим, что для соблюдения последнего условия приходится предварительно заменять плазму крови, имеющую проводимость выше, чем внутренняя часть клетки, на раствор сахара, который имеет низкую проводимость, но обеспечивает осмотическое равновесие, без которого клетки гибнут.

Соответствующая теория изложена в монографии [2], где получено распределение электрического поля вокруг такого объекта. Возмущение внешнего электрического поля соответствует возникновению дипольного момента $\vec{p}$, величина которого зависит от параметров клетки, жидкости и частоты поля. В рассматриваемом микрочипе [1] используется такой набор параметров, что этот дипольный момент лишь на несколько процентов меньше того, который возник бы на идеально проводящем шаре:

$$\vec{p} = 4\pi R^3 \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (1)$$

где R – радиус шара; ε – диэлектрическая проницаемость жидкости; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\vec{E}$ – напряженность внешнего электрического поля в жидкости.

Если электрическое поле неоднородно, на диполь действует сила

$$\vec{F} = (\vec{p} \text{ grad}) \vec{E},$$

которая с учетом (1) может быть записана в виде

$$\vec{F} = 2\pi R^3 \varepsilon \varepsilon_0 \text{ grad } E^2.$$

При движении шара в вязкой жидкости на него действует сила трения, которая может быть вычислена по закону Стокса:

$$\vec{T} = -6\pi R \eta \vec{V},$$

где $\vec{V}$ – скорость шара; η – динамическая вязкость. В рассматриваемых явлениях инерцией можно пренебречь, и из равенства нулю суммы рассматриваемых двух сил получаем вектор скорости движения шара

$$\vec{V} = \frac{R^2 \varepsilon \varepsilon_0}{3\eta} \text{ grad } E^2,$$

позволяющий записать уравнение для координат центра шара $\vec{r}$ в виде

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{R^2 \varepsilon \varepsilon_0}{3\eta} \text{ grad } E^2(\vec{r}). \quad (2)$$

Таким образом, математическая модель процесса сводится к построению пространственного распределения напряженности электрического поля и интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2) независимо для каждой клетки.

Краевая задача для электрического поля. При используемой в моделируемом устройстве [1] частоте 1 МГц в жидкости с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 78$ и проводимостью $\sigma = 0.00176$ См/м длина электромагнитной волны $\lambda \approx 30$ м и толщина скин-слоя $\delta \approx 10$ м. Поскольку размеры устройства в десяток тысяч раз меньше, мы пренебрегаем вихревым электрическим полем. Его напряженность будет оценена ниже. Для безвихревого поля можно ввести электрический потенциал V такой, что

$$\vec{E} = - \text{grad } V. \quad (3)$$

Он удовлетворяет уравнению электропроводности, которое в однородном проводнике, занимающем область Ω , имеет вид уравнения Лапласа

$$-\Delta V = 0. \quad (4)$$

Стенки сосуда, ограничивающего жидкость, состоят из N участков изолятора Γ_n , на которых равна нулю нормальная компонента плотности тока, что эквивалентно нулевой производной потенциала в направлении, нормальном к границе:

$$\frac{\partial V}{\partial n} \Big|_{\Gamma_n} = 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad (5)$$

и из M участков идеального проводника, т. е. электродов γ_m , на которых заданы значения потенциала

$$V \Big|_{\gamma_m} = 0, \quad m = 1, \dots, M. \quad (6)$$

В достаточно общих предположениях относительно формы области, граничных изоляторов и электродов краевая задача (4)–(6) имеет, причем единственное, решение. Доказательство – аналогично приведенному в работе [3] для задачи с двумя электродами.

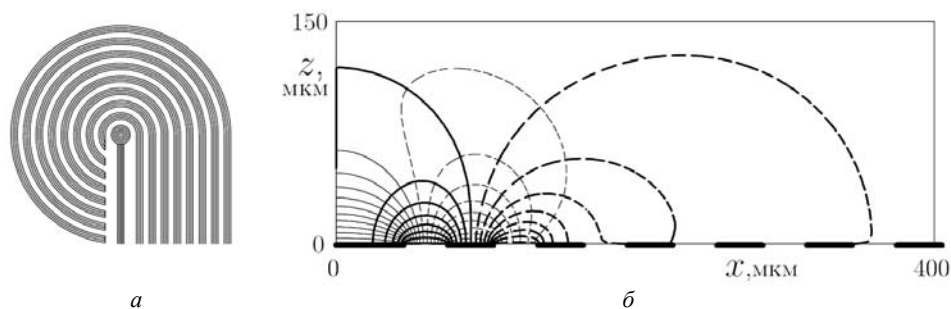


Рис. 1. Форма электродов. Радиус внешнего электрода 525 мкм (а). Электрическое поле на последнем этапе концентрирования клеток: жирными отрезками ниже горизонтальной оси показаны электроды кроме двух внешних, тонкие кривые – эквипотенциали с шагом $\delta V = 1$ В, жирные – линии тока. Между соседними линиями течет ток $\delta C = 1$ мкА (б)

Моделируемый микрочип представляет собой заполненный жидкостью цилиндр диаметром 4,5 мм и высотой 6 мм с пластиковой боковой стенкой и стеклянными крышкой и дном. На нижнем стекле напылены электроды, форма которых показаны на рис. 1, а. Радиус внешнего электрода 525 мкм.

Если сделать электроды в виде целых концентрических колец, подавая напряжения на них через отверстия в стекле, задача была бы осесимметричной и потенциал $V(r, z)$ не зависел бы от третьей цилиндрической координаты ϕ . Соответствующие напряженность электрического поля и плотность тока имеют нулевые азимутальные компоненты. Поэтому решение остается справедливым для любого сектора $\phi_1 < \phi < \phi_2$, ограниченного изолятором. Например, можно установить изолятор вместо всей нижней на рис. 1, а половины устройства, исключив тем самым не кольцевые участки электродов, что несложно сделать на практике. Поскольку такая осесимметричная задача гораздо проще решается, чем трехмерная, но позволяет увидеть важные свойства микрочипа, мы ограничимся именно осесимметричной моделью. Уравнение электропроводности (4) принимает вид

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (7)$$

условия (6) ставятся на $M = 9$ электродах, условия (5) – на остальной части границы. На оси симметрии, $r = 0$, как на дополнительном участке границы следует выполнить условие

$$\frac{\partial V}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (8)$$

Чтобы его получить, проинтегрируем закон сохранения заряда по малому цилиндру, окружающему ось, в предположении гладкости функций:

$$\pi r^2 \sigma (E_z(0, z + \delta z) - E_z(0, z)) + 2\pi r \delta z \sigma E_r(r, z) = 0.$$

При $r \rightarrow 0$ получаем

$$E_z(0, z + \delta z) - E_z(0, z) = -2\delta z E_r(r, z) / r,$$

т. е. в некоторых точках этого интервала на оси $E_z = \infty$, если $E_r(0, z) \neq 0$, так как $1/r \rightarrow \infty$. Такое поле соответствует логарифмической особенности плотности джоулевой диссипации, что противоречит

конечности подведенной к проводнику электрической энергии.

Работа устройства состоит из последовательности 8 этапов, на каждом из которых в течение 20 с напряжение подается на пару соседних электродов, начиная с внешних. Соответственно, задачу (7)–(8) необходимо решить 8 раз со своими наборами значений V_m . Наш многосеточный вариационно-разностный метод численного решения таких задач изложен в монографии [4]. Более простой, но достаточно эффективный алгоритм изложен в работе [5]. В дальнейшем целесообразно использовать сетки, описанные в работе [6].

Для наглядности представления результатов наряду с эквипотенциалами $V(r, z) = \text{const}$ используем линии тока, которые в нашем случае совпадают с линиями уровня $C(r, z) = \text{const}$ токовой функции:

$$C(r, z) = \int_0^r j_z(r', z) 2\pi r' dr'.$$

На рис. 1, б показано электрическое поле на последнем этапе концентрирования клеток, когда на центральном электроде потенциал $V_1 = 10$ В, на соседнем $V_2 = -10$ В, и $V_n = 0$ – на остальных.

На рис. 2 тонкими линиями показаны линии уровня E^2 для первого этапа, когда $V_1 = \dots = V_7 = 0$, $V_8 = 10$ В, $V_9 = -10$ В. Следует отметить, что вблизи всех краев электродов поле имеет особенность $E \approx 1/\rho \rightarrow \infty$, где ρ – расстояние от линии, разделяющей электрод и изолятор. Эта линия изображается точкой на наших рисунках в плоскости r, z . Разумеется, реальное поле не растет до бесконечности, хотя это и не противоречит конечности джоулевой диссипации. Возрастание ограничено конечностью толщины электродов. Она намного меньше диаметра клеток $2R = 10$ мкм, который мы задаем, следуя статье [1]. Поэтому эти особенности нас пока не интересуют.

Получившиеся электрические токи $C < 10^{-4}$ А. Они порождают азимутальное магнитное поле $B(r, z) = \mu_0 C(r, z) / (2\pi r) < 10^{-3}$ Тл. Вихревое электрическое поле удовлетворяет уравнению индукции

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} d\vec{S}.$$

Поскольку магнитное поле велико лишь в небольшой области вблизи пары электродов, имеющей размер порядка 30 мкм, и частота $f = 1$ МГц, получаем оценку правой части $< 10^{-3}$ В. Эта величина действительно пренебрежимо мала по сравнению с интересующими нас потенциалами порядка вольт. Этим оправдано представление (3).

Движение клеток. Хотя изначально клетки распределены по жидкости случайным образом, чтобы охарактеризовать эффективность их перемещения в малую область, можно расставить их регулярно с постоянной по объему плотностью, как показано светлыми кружками на рис. 2. С увеличением расстояния от оси клетки расположены чаще, поскольку пропорционально r растет объем, приходящийся на каждую нарисованную клетку.

Численное интегрирование системы уравнений (2) дает траекторию центра каждой клетки. Используем метод Эйлера с пересчетом. Полученные траектории

показаны жирными линиями на рис. 2. Темными кружками показано положение клеток по окончании первого этапа. Изображена только та часть устройства, в которой перемещение клеток заметно. Слияние траекторий не означает, что клетки сталкиваются, они лишь оказываются на одной окружности.

На рис. 3 показано положение клеток по завершении восьмого этапа и проведены траектории за все этапы концентрирования, включая начерченные на предыдущем рис. 2. Тонкие линии – это линии уровня E^2 для последнего этапа. Они соответствуют приведенным на рис. 1, б эквипотенциалам.

Около всех краев электродов есть особенности поля, которые втягивают клетки. Поэтому клетки, оказавшиеся после некоторого этапа вблизи края любого электрода, так и остаются там на следующих этапах, и значит, не приходят в нужную нам центральную область. Этого можно избежать, если сделать для клеток недоступный приграничный слой толще 3 мкм, как это сделано при расчете траекторий, показанных на рис. 3.

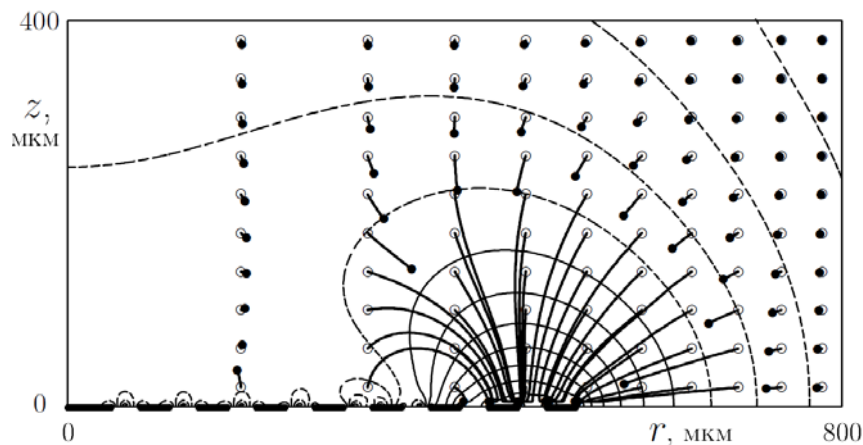


Рис. 2. Траектории движения клеток: светлые кружки – начальное положение, темные – после первого этапа; тонкие кривые – линии уровня E^2 в логарифмическом масштабе для первого этапа, сплошные – при $E^2 \geq (10^4 \text{ В/м})^2$ и штриховые – при меньших напряженностях. Значения E^2 на соседних линиях отличаются в $\sqrt{10}$ раз

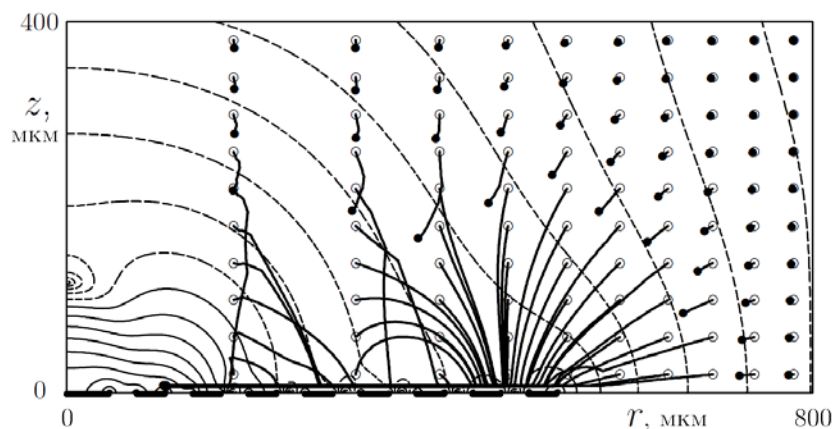


Рис. 3. Траектории движения клеток в течение всех восьми этапов: светлые кружки – начальное положение, темные – после восьмого этапа; тонкие линии – линии уровня E^2 в логарифмическом масштабе для восьмого этапа, сплошные – при $E^2 \geq (10^4 \text{ В/м})^2$; значения E^2 на соседних линиях отличаются в $\sqrt{10}$ раз

Все захваченные клетки оказались вблизи внешнего края второго электрода. Видные на рисунке особенности поля занимают примерно по половине этого электрода. Поэтому только дополнительный уход на 15 мкм влево позволил бы клеткам перескочить на левый край электрода.

Удалось собрать 41 клетку из 100 изображенных, т. е. всего 0,35 % клеток из 12 000 имевшихся во всем объеме жидкости, который составляет 95 мм³. Объем эффективного захвата клеток мал соответственно глубине проникновения электрического поля, которая определяется масштабом электродов. Это общий недостаток устройств с неподвижной жидкостью. В проточных устройствах типа [7] клетки приближаются к электродам с потоком жидкости, а сильное поле удерживает их в малой области, не мешая жидкости утекать дальше.

Для увеличения доли выделенных из жидкости клеток можно уменьшать ее объем. Расчеты показывают, что уменьшение диаметра сосуда до 2 мм и высоты до 0,5 мм распределения полей в областях, показанных на рис. 1–3, практически не изменяются, и поэтому количество собранных на второй электрод клеток остается прежним. Поскольку полное число клеток в жидкости при той же концентрации уменьшается в 60 раз, доля собранных клеток увеличивается до 20 %.

Построенные распределения поля также позволяют найти плотность джоулевой диссипации, которая определяет нагрев жидкости. Сила тока, протекающего через устройство, составляет от 80 мкА на первом этапе до 15 мкА на последнем. За весь процесс выделяется около 0,03 Дж тепловой энергии, которая обеспечивает нагрев жидкости на 0,1 К. Если массу жидкости уменьшить в 60 раз, нагревание составит примерно 5 К, что еще допустимо.

Нагревание происходит, в основном, вблизи электродов. Соответствующее тепловое расширение жидкости приводит к возникновению конвекции [8], что должно быть учтено при совершенствовании модели. В некоторой мере конвекция уменьшает роль отмеченного выше недостатка конструкции, так как обеспечивает конвективную доставку клеток к электродам.

Таким образом, построены пространственные распределения электрического поля и рассчитаны траектории движения клеток в осесимметричном многоэлектродном устройстве, предназначенном для электрофореза живых клеток. Показано, что эффективность его работы ограничена малостью пространственного масштаба поля и наличием особенностей поля, которые возникают вблизи краев тонких электродов.

Библиографические ссылки

1. Huang C.-T., Amstislavskaya T. G., Chen G.-H. et al. Selectively concentrating cervical carcinoma cells from red blood cells utilizing dielectrophoresis with circular ITO electrodes in stepping electric fields // *J. of medical and biological engineering*. 2012. Vol. 33(1). P. 51–58.
2. Jones T. B. *Electromechanics of particles*. New York: Cambridge University Press, 1995.
3. Денисенко В. В. Энергетический метод решения трехмерной смешанной краевой задачи для эллипти-

ческого уравнения с несимметричной матрицей коэффициентов. 1981. 27 с. Деп. ВИНТИ. № 5647-81.

4. Денисенко В. В. Энергетические методы для эллиптических уравнений с несимметричными коэффициентами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. 204 с.

5. Shaidurov V. V., Tobiska L. The convergence of the cascading conjugate-gradient method applied to elliptic problems in domains with re-entrant corners // *Mathematics of Computation*. 1999. Vol. 69, № 230. P. 501–520.

6. Киреев И. В., Ищенко А. В. Фрактальный алгоритм построения двумерных вложенных сеток. // *Вестник СибГАУ*. 2011. Вып. 2 (35). С. 20–24.

7. Gao J., Yin X.-F., Fang Z.-L. Integration of single cell injection, cell lysis, separation and detection of intracellular constituents on a microfluidic chip // *Miniaturisation for chemistry, biology & bioengineering*. 2004. Vol. 4. P. 47–52.

8. Andreev V. K., Bekezhanova V. B. Instability of the equilibrium state of liquid with a free surface in the presence of volume heat sources // *Fluid Dynamics*. 2008. Vol. 43, no. 2. P. 176–184.

References

1. Huang C.-T., Amstislavskaya T. G., Chen G.-H., Chang H.-H., Chen Y.-H., Jen C.-P. Selectively concentrating cervical carcinoma cells from red blood cells utilizing dielectrophoresis with circular ITO electrodes in stepping electric fields. *Journal of medical and biological engineering*. 2012, vol. 33(1), p. 51–58.
2. Jones T. B. *Electromechanics of particles*. New York, Cambridge University Press, 1995.
3. Denisenko V. V. *Energeticheskij metod resheniya trekhmernoi smeshannoi kraevoi zadachi dlya ellipticheskogo uravneniya s nesimmetrichnoi matritsei koefitsientov* (Energy method for three dimensional boundary value problem of mixed type for an elliptical equation with nonsymmetrical coefficient matrix). Dep. VINITI. 1981, № 5647-81, 27 p.
4. Denisenko V. V. *Energeticheskij metod dlya ellipticheskikh uravnenii s nesimmetrichnymi koefitsientami* (Energy methods for elliptic equations with nonsymmetrical coefficients). Novosibirsk, Publ. house of the Russian Academy of Sciences Siberian Branch, 1995, 204 p.
5. Shaidurov V. V., Tobiska L. The convergence of the cascading conjugate-gradient method applied to elliptic problems in domains with re-entrant corners. *Mathematics of Computation*. 1999, vol. 69, № 230, p. 501–520.
6. Kireev I. V., Ishchenko A. V. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 2(35), p. 20–24.
7. Gao J., Yin X.-F., and Fang Z.-L. Integration of single cell injection, cell lysis, separation and detection of intracellular constituents on a microfluidic chip. *Miniaturisation for chemistry, biology & bioengineering*. 2004, vol. 4, p. 47–52.
8. Andreev V. K., Bekezhanova V. B. Instability of the equilibrium state of liquid with a free surface in the presence of volume heat sources. *Fluid Dynamics*, 2008, vol. 43, no. 2, p. 176–184.

© Денисенко В. В., Замай С. С., Замай А. С., 2013

УДК 004.056

**МОДИФИЦИРОВАННОЕ БЕЗОПАСНОЕ СКАЛЯРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ
В КОНФИДЕНЦИАЛЬНОМ КЛАСТЕРНОМ АНАЛИЗЕ K-MEANS
С ВЕРТИКАЛЬНЫМ СЕКЦИОНИРОВАНИЕМ ДАННЫХ***

В. Г. Жуков, А. В. Вашкевич

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com, alex23-5@yandex.ru

Рассматриваются актуальные проблемы в разработке и применении протоколов обеспечения конфиденциальности вычислений в многостороннем кластерном анализе данных. Приведено общее описание конфиденциальных многосторонних вычислений, определена модель нарушителя. Представлены недостатки одного из существующих решений конфиденциального кластерного анализа методом k-means при вертикальном секционировании данных; предложены пути их устранения с помощью корректного применения криптографического примитива, реализующего безопасное скалярное произведение. Приведённый математический аппарат описывает все аспекты исходного протокола и детали его модернизации. Статья содержит сравнительный анализ усовершенствованного криптографического примитива с аналогом – безопасной суммой. Сформулированы выводы об эффективности усовершенствованного криптографического примитива безопасного скалярного произведения и рекомендации по применению разработанной модели.

Ключевые слова: конфиденциальные многосторонние вычисления, криптографические примитивы, кластерный анализ k-means, вертикальное секционирование, безопасное скалярное произведение.

**A MODIFIED SECURE DOT PRODUCT IN THE PRIVACY-PRESERVING K-MEANS CLUSTERING
WITH THE VERTICAL PARTITIONING DATA**

V. G. Zhukov, A. V. Vashkevich

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com, alex23-5@yandex.ru

The authors consider the actual problems in the design and implementation of the privacy-preserving computations in the multiparty data clustering. There is a basic description of the secure multiparty computations and the definition of the adversary model in it. This article presents the flaws of existing solutions of the privacy-preserving k-means clustering over the vertically partitioned data, and proposed ways to eliminate these disadvantages by the correct using the cryptographic primitive realized secure dot product. The mathematical apparatus given in this article describes all aspects of the original protocol and the details of its modernization. The article has a comparative analysis of the advanced cryptographic primitive with its analog – secure sum. There are conclusions about the effectiveness of improved cryptographic primitive of the secure dot product and recommendations on application of the developed model.

Keywords: secure multiparty computations, cryptographic primitives, k-means clustering, vertical partition, secure dot product.

При проведении совместного анализа данных, принадлежащих разным организациям (пользователям) и являющихся конфиденциальными, не всегда достаточно обеспечения той конфиденциальности, что достигается при помощи традиционных криптосистем; необходимо обеспечить получение совместного результата без раскрытия самих исходных данных [1]. Задачи такого вида называются конфиденциальными многосторонними вычислениями (КМВ) – используются специальные протоколы, позволяющие нескольким участникам произвести вычисления на основе конфиденциальных входных данных каждого из них. После выполне-

ния протокола КМВ каждый из участников получает результат вычисления, но ни один из них не должен иметь возможность получения никакой дополнительной информации о данных других участников.

В алгоритмах конфиденциальной кластеризации используется модель с получестными (semi-honest) участниками. Получестный участник следует протоколу, но волен использовать ту информацию, к которой он имеет доступ во время выполнения протокола, для попытки раскрытия данных других участников. При этом рассматривается возможность сговора (т. е. объединения знаний) некоторых из участников [2].

* Работа поддержана грантом Президента молодым кандидатам наук, договор № 14.124.13.473-МК от 04.02.2013.

Участник №1		Участник №2	Участник №3		
Атрибут №1	Атрибут №2	Атрибут №1	Атрибут №1	Атрибут №2	Атрибут №3

Рис. 1. Пример вертикального секционирования

На первом этапе исследований по применению КМВ в кластерном анализе рассматривался алгоритм, позволяющий работать с большими объемами данных и имеющий простую структуру. Наиболее распространенным и изученным алгоритмом кластерного анализа, удовлетворяющим предъявляемым требованиям, является алгоритм k-means.

Данные для многостороннего кластерного анализа могут быть по-разному распределены между участниками. Существует вертикальное (участники содержат разные столбцы данных), горизонтальное (участники содержат разные строки данных) и арбитражное (произвольное) секционирования данных. В вертикальном секционировании данных (рис. 1) каждый участник имеет набор только некоторых атрибутов, но каждого из объектов. При таком секционировании начальный выбор центров кластеров не является конфиденциальным, а защищаются такие шаги k-means, как вычисление расстояний между каждой точкой и центрами, выбор минимального расстояния для каждой точки, а также проверка условия останова кластеризации. Алгоритм конфиденциальной кластеризации методом k-means при вертикальном секционировании:

Требуется: r участников, k кластеров, n точек.

1: для всех участников $j = 1, \dots, r$

2: для всех кластеров $i = 1, \dots, k$

3: произвольная инициализация центров кластеров μ'_{ij}

4: повторять

5: для всех участников $j = 1, \dots, r$

6: для всех кластеров $i = 1, \dots, k$

7: $\mu_{ij} = \mu'_{ij}$

8: кластер $[i] = \emptyset$

9: для всех точек $g = 1, \dots, n$

10: для всех участников $j = 1, \dots, r$

11: {Вычисление вектора X_j от точки g

до каждого центра кластера по измерению j }

12: для всех кластеров $i = 1, \dots, k$

13: $x_{ij} = |\text{данные точки } g_j -$

данные центра кластера $\mu_{ij}|$

14: каждый участник помещает g в кластер [ближайший] {алгоритм определения ближайшего кластера должен сохранять конфиденциальность}

15: для всех участников $j = 1, \dots, r$

16: для всех кластеров $i = 1, \dots, k$

17: μ'_{ij} – среднее всех точек кластера $[i]$

по атрибуту j

18: пока не выполнится условие останова {алгоритм проверки условия останова должен сохранять конфиденциальность}

За основу для модернизации [3] взята схема конфиденциального кластерного анализа k-means при вертикальном секционировании, предложенная Саметом и соавторами [4], так как в отличие от других решений для данного секционирования в ней отсутствуют так называемые «особые» участники, выполняющие дополнительные операции с данными.

Обозначим набор атрибутов, содержащихся у P_i (участника под номером i), как $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\}$. Также P_i владеет наборами атрибутов каждого из центров кластеров $\mu_{ji} = \{\mu_{ji1}, \mu_{ji2}, \dots, \mu_{jim}\}$. Затем каждый участник суммирует расстояния между соответствующими измерениями. Так, порция расстояния между точкой и центром кластера μ_{ji} у участника P_i будет выглядеть следующим образом (пример для квадрата евклидова расстояния):

$$d_{ji} = (a_{i1} - \mu_{ji1})^2 + (a_{i2} - \mu_{ji2})^2 + \dots + (a_{im} - \mu_{jim})^2$$

Просуммировав по всем участникам эти расстояния, получим $d_{j1} + d_{j2} + \dots + d_{jr}$, где r – число участников. Для центра другого кластера μ_q имеем похожую формулу $d_{q1} + d_{q2} + \dots + d_{qr}$. Чтобы определить, какой из кластеров (j или q) ближе к точке, нужно просуммировать значения $\sum_{i=1}^r (d_{ji} - d_{qi}) = \sum_{i=1}^r d_i$. Если результат положительный, μ_q будет ближе к точке,

иначе ближе μ_j . Этот шаг повторяется $k-1$ раз, чтобы найти минимальное из расстояний от точки до центра кластера. При этом ни одно из расстояний не раскрывается.

Однако реализация данной схемы Саметом и соавторами имела два существенных недостатка, которые обязательно требовалось устранить:

– для двух участников применялся криптографический примитив «безопасное скалярное произведение» [5], предложенный Малеком и Мири;

– для участников количеством более двух применялся примитив «безопасная сумма» [6], в котором раскрываются данные любого из участников при створе его соседей по алгоритму.

Схема применения Саметом и соавторами криптографического примитива «Безопасное скалярное произведение»:

0) Участник P_1 имеет конфиденциальное значение $d_{j1} - d_{q1} = d_1$, а P_2 имеет конфиденциальное значение $d_{j2} - d_{q2} = d_2$, требуется получить числа l_1 и l_2 такие, чтоб l_1 хранился у P_1 , l_2 у P_2 и $l_1 \cdot l_2 = d_1 + d_2$;

1) P_1 генерирует случайное ненулевое число l_1 и создаёт вектор $X = \left(\frac{d_1}{l_1}; \frac{1}{l_1}\right)$, а P_2 создаёт вектор $Y = (1; d_2)$;

2) P_1 и P_2 выполняют безопасное скалярное произведение [5] и P_2 получает число l_2 такое, что $l_1 \cdot l_2 = d_1 + d_2$.

3) P_2 посылает знак l_2 . Если $l_2 = 0$, то до обоих кластеров одинаковое расстояние, если $l_2 \neq 0$, то знак показывает кластер, до которого расстояние меньше.

Формальное описание протокола безопасного скалярного произведения:

Предположим, что у двух участников (назовем их Алисой и Бобом) есть по n -мерному вектору: $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – у Алисы и $\bar{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – у Боба. Каждое измерение вектора является конечным полем F_p , а пространство векторов – конечным n -мерным расширением F_p^n конечного поля F_p .

Алиса и Боб хотят совместно и с сохранением конфиденциальности посчитать $\bar{x} \cdot \bar{y}$. Результат протокола должен быть известен только Алисе. Входные данные каждого из участников не должны быть раскрыты друг другу. Для достижения этих целей Алиса и Боб выполняют следующий протокол:

1. Алиса генерирует случайные вектор $\bar{\phi} \in F_p^n$ и числа $a, b, c, d \in F_p$ такие, что $(ad - bc)^{-1} \neq 0 \in F_p$. Алиса вычисляет следующие векторы:

$$\bar{u} = a\bar{x} + b\bar{\phi},$$

$$\bar{v} = c\bar{x} + d\bar{\phi}.$$

2. Затем Алиса посылает векторы $\bar{u}$ и $\bar{v}$ Бобу. Зная свой вектор $\bar{y}$, Боб вычисляет $\bar{y} \cdot \bar{u}$ и $\bar{y} \cdot \bar{v}$. Затем Боб отправляет результаты обратно Алисе.

3. Алиса вычисляет $(ad - bc)^{-1} (d(\bar{y} \cdot \bar{u}) - b(\bar{y} \cdot \bar{v}))$, что эквивалентно $\bar{x} \cdot \bar{y}$.

Следует отметить два момента, из-за которых применение данной схемы некорректно. Первым таким моментом является то, что примитив Малека и Мири предназначен для конечных полей. Таким образом, нельзя после выполнения примитива использовать знаки чисел l_1 и l_2 для достоверного определения знака суммы $d_1 + d_2$.

Пример, доказывающий данное утверждение:

Есть конечное поле

$$\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}.$$

$$d_1 = -1, d_2 = -2.$$

Допустим, $l_1 = 2$. Тогда после проведения безопасного скалярного произведения будет получено $l_2 = 4$, так как в данном конечном поле $2 \cdot 4 = -1 - 2$. Знаки чисел l_1 и l_2 оба положительные, а знак суммы отрицателен. Следовательно, данный протокол не всегда работает в конечных полях.

Таким образом, использование знаков после операций в конечных полях не всегда будет давать корректный результат. Данный недостаток устраняется использованием множества вещественных чисел вместо конечных полей. При этом все операции безопасного скалярного произведения сохраняют корректность. Данное решение также имеет полезность в том, что использование конечных полей ухудшает точность проведения кластерного анализа, так как необходимо было бы «накладывать» область допустимых значений на конечное поле, что породило бы погрешность из-за необходимости квантования.

Вторым моментом, из-за которого некорректно применение предложенной Саметом и соавторами схемы, является использование двумерных векторов

$$(1; d_2) \text{ и } \left(\frac{d_1}{l_1}; \frac{1}{l_1}\right).$$

Анализ криптографического примитива показал, что использование двумерных векторов раскрывает данные Боба Алисе. Причина в шаге 2 криптографического примитива, когда Боб посылает Алисе результаты скалярных произведений $\bar{y} \cdot \bar{u}$ и $\bar{y} \cdot \bar{v}$. Алиса, таким образом, получает два уравнения с двумя неизвестными:

$$y_1 u_1 + y_2 u_2 = \bar{y} \cdot \bar{u},$$

$$y_1 v_1 + y_2 v_2 = \bar{y} \cdot \bar{v},$$

где векторы $\bar{u}$ и $\bar{v}$ уже известны Алисе, а результаты скалярных произведений $\bar{y} \cdot \bar{u}$ и $\bar{y} \cdot \bar{v}$ она получила от Боба. Решив эти уравнения, Алиса вычисляет значе-

ния $\frac{d_1}{l_1}$ и $\frac{1}{l_1}$, откуда узнает d_1 , т. е. косвенные сведения о данных Боба ($d_{j1} - d_{q1}$, разница между расстояниями от точки до одного кластера и до другого) становятся известны Алисе и, следовательно, нет обеспечения конфиденциальности данных одного из участников кластерного анализа.

Эту проблему можно решить, искусственно разбив два измерения векторов $(1; d_2)$ и $\left(\frac{d_1}{l_1}; \frac{1}{l_1}\right)$ на три. После разбиения векторы будут выглядеть следующим образом:

– вектор Алисы $(1; d_2)$,

– вектор Боба $\left(\frac{d_1+z}{l_1}; \frac{-z}{l_1}; \frac{1}{l_1}\right)$,

где z – случайное число, сгенерированное Бобом. Скалярное произведение данных векторов останется прежним, но теперь в двух уравнениях станет три неизвестных: $\frac{d_1+z}{l_1}$, $\frac{-z}{l_1}$ и $\frac{1}{l_1}$, из которых «любопытному» (согласно модели нарушителя) участнику Алисе в общем случае будет нельзя получить значение d_1 Боба. Однако при определенных параметрах векторов $\bar{u}$ и $\bar{v}$ раскрытие информации все-таки останется возможным, поэтому Боб должен проверять присланные ему от Алисы векторы $\bar{u}$ и $\bar{v}$ на следующие условия (они могут выполняться по отдельности, но не одновременно):

$$u_1 = u_2,$$

$$v_1 = v_2,$$

потому что при выполнении обоих этих условий из уравнений можно будет узнать отдельно $\frac{d_1+z}{l_1} + \left(\frac{-z}{l_1}\right)$ и $\frac{1}{l_1}$, а значит, получить

$$\left(\frac{d_1+z}{l_1} + \left(\frac{-z}{l_1}\right)\right) \cdot l_1 = d_1.$$

Также следует отметить, что безопасное скалярное произведение проводится для двух участников. При использовании этого примитива для нескольких участников следует применять схему, также описанную у Самета и соавторов. Пример для трёх участников:

1. P_3 дробит своё значение d_3 на случайные кусочки d_{31} и d_{32} такие, что $d_{31} + d_{32} = d_3$, и выбирает случайное число $r_3 \neq 0$.

2. P_3 и P_1 выполняют SDP, и P_1 получает s_1 такое, что $d_{31} + d_1 = r_3 \cdot s_1$.

3. P_3 и P_2 выполняют SDP, и P_2 получает s_2 такое, что $d_{32} + d_2 = r_3 \cdot s_2$.

4. P_2 и P_1 выполняют SDP для получения $s_1 + s_2$.

5. На выходе получается:

$$d_1 + d_2 + d_3 = r_3 \cdot (s_1 + s_2) = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \text{ (рис. 2).}$$

Причем участник P_i знает только d_i и r_i .

6. Если $r_1 = 0$, P_1 рассылает всем флаг, что расстояния до кластеров одинаковые, иначе он посылает знак r_1 участнику P_2 , тот умножает знак r_1 на знак r_2 и посылает участнику P_3 . Участник P_3 умножает полученный знак на знак r_3 и узнает, какой из кластеров ближе к точке, а затем рассылает всем.

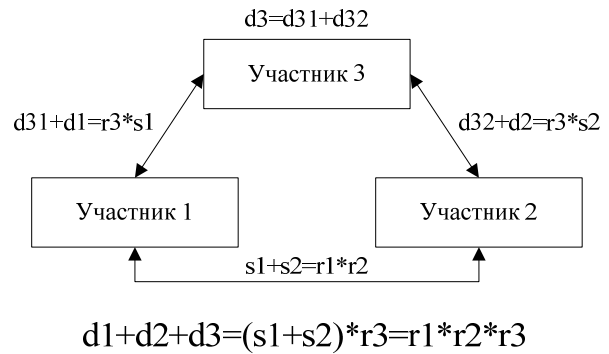


Рис. 2. Схема безопасного скалярного произведения для трех участников

Основной минус данного алгоритма в том, что количество данных, передаваемых по сети, растёт пропорционально квадрату количества участников. Именно по этой причине алгоритм не подходит для кластерного анализа с большим количеством участников и обрабатываемых данных, поскольку он применяется на каждой итерации для каждого объекта данных $k-1$ раз.

В связи с проектированием программного обеспечения, реализующего данный протокол, стало возможно сравнить сетевой трафик (рис. 3), генерируемый алгоритмом с использованием того или иного криптографического примитива.

Тем не менее, если к конфиденциальности предъявляются жёсткие требования, следует применять примитив «безопасное скалярное произведение», поскольку в нём гарантируется сохранение конфиденциальности даже при сговоре против одного из участников всех остальных (рис. 4).

Таким образом, устранив недостатки схемы по применению безопасного скалярного произведения, можно использовать данный криптографический примитив для определения ближайшего кластера. Однако применение безопасного скалярного произведения требует передачи данных от каждого участника каждому, что при большом количестве участников и большом количестве объектов данных приведет к большому объему трафика. Поэтому использование безопасного скалярного произведения рекомендуется к применению для малого количества объектов данных или участников, когда велик риск сговора и на первый план выходит обеспечение конфиденциальности данных в ущерб скорости работы алгоритма.

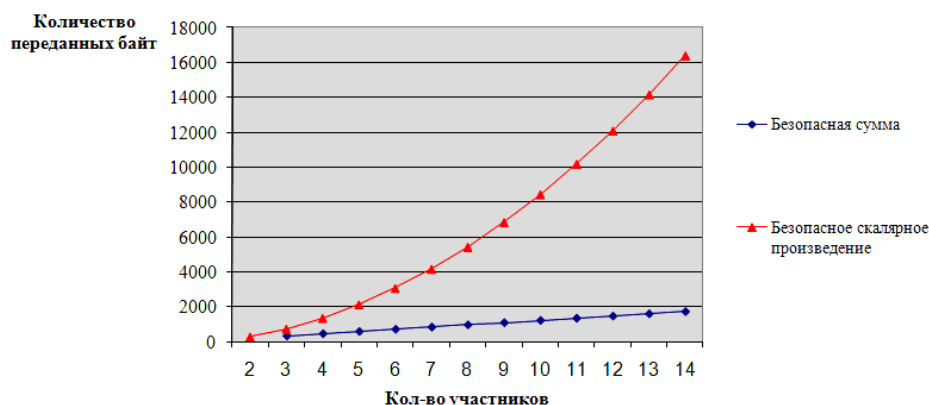


Рис. 3. Зависимость количества переданных байт за одну операцию сравнения расстояний от количества участников

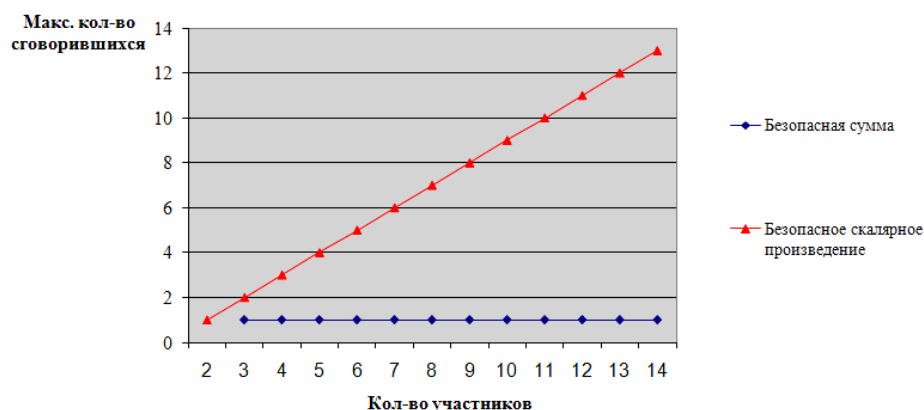


Рис. 4. Зависимость максимального допустимого количества сговорившихся участников от общего количества участников

Библиографические ссылки

1. Шутый Р. С. Рандомизированные протоколы, применяемые для выполнения конфиденциальных многосторонних вычислений в компьютерных сетях / Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2009. 170 с.
2. Жуков В. Г., Стефаров А. П. Формирование типовой модели нарушителя правил разграничения доступа в автоматизированных системах // Известия ЮФУ. Техн. науки: науч.-техн. и прикладной журнал. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2012. Вып. 12 (137). С. 45–54.
3. Жуков В. Г., Вашкевич А. В. Конфиденциальный кластерный анализ при вертикальном секционировании данных // Информационная безопасность – 2013 : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Ч. I. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2013. С. 191–198.
4. Samet S., Miri A., Orozco-Barbosa L. Privacy-Preserving K-Means Clustering in Multi-Party Environment // Proceedings of International Conference on Security and Cryptography, Barcelona, Spain, 2007. С. 381–385.
5. Malek B., Miri A. Secure dot-product protocol using trace functions // Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Information Theory, 2006. С. 927–931.
6. Clifton C., Kantarcioglu M., Vaidya J., Lin X., Zhu M. Tools for privacy preserving data mining // SIGKDD Explorations, 2002. Vol. 4(2). С. 28–34.

References

1. Shutyi R. *Randomizirovannye protokoly, primenjaemye dlja vypolnenija konfidencial'nyh mnogostoronnih vychislenij v komp'yuternyh setjah* (Randomized protocols applied for performing secure multiparty computations in computer networks). The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 2009, 170 p.
2. Zhukov V. G., Stefarov A. P. *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2012, no. 12 (137), p. 45–54.
3. Zhukov V. G., Vashkevich A. V. *Materialy XIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Informacionnaja bezopasnost'-2013"* (Proceedings of the 13th International Scientific Conference "Information Security-2013"), Russia, Taganrog, 2013, vol. 1, p. 191–198.
4. Samet S., Miri A., Orozco-Barbosa L. *Proceedings of the 2007 International Conference on Security and Cryptography, Barcelona, Spain, 2007*, p. 381–385.
5. Malek B., Miri A. *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2006, p. 927–931.
6. Clifton C., Kantarcioglu M., Vaidya J., Lin X., Zhu M. Tools for privacy preserving data mining (2002) *SIGKDD Explorations*, 4(2), p. 28–34.

© Жуков В. Г., Вашкевич А. В., 2013

УДК 519.6

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

В. Б. Звонков, А. М. Попов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: vladimirzvonkov802@yandex.ru, vm_popov@sibsau.ru

Данная работа посвящена сравнительному исследованию применения классических методов оптимизации нулевого, первого, второго порядков, а также генетических модификаций при решении сложных задач оптимизации с различными особенностями, что является актуальной современной научной проблемой. Дело в том, что классические методы оптимизации, основанные на вычислении производных функции первого и второго порядков или только значений функции, не способны оптимизировать многоэкстремальные, овражные функции с множеством нерегулярных локальных оптимумов и т. д. Поэтому в данных случаях применяются генетические алгоритмы и их модификации. Для сравнения методов были разработаны программные системы на языке C++, отлажены и протестированы на представительном множестве задач. Результаты экспериментов обрабатывались статистическими методами. В ходе проведенных исследований была доказана высокая эффективность и целесообразность применения самонастраивающегося генетического алгоритма однокритериальной глобальной оптимизации. Ранее была показана целесообразность применения разработанной модификации при решении различных классов задач оптимизации и интеллектуального анализа данных.

Ключевые слова: генетический алгоритм, безусловная, однокритериальная оптимизация, классические методы, нулевой, первый, второй порядок.

COMPARATIVE INVESTIGATION OF CLASSICAL OPTIMIZATION METHODS AND GENETIC ALGORITHMS

V. B. Zvonkov, A. M. Popov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: vladimirzvonkov802@yandex.ru, vm_popov@sibsau.ru

This paper is devoted to the comparative investigation of the application of the classical optimization methods (zero, first and second orders) and also genetic modifications for solving of the complex optimization problems with various specific features. It is an actual modern scientific problem. The classical optimization methods based on calculation of the first and second derivatives of the function or only function values are not capable to optimize multiextreme, ravine surface functions with the set of irregular local optimum, etc. Therefore genetic algorithms and its modifications are applied in these situations. Program systems have been developed for comparison of methods with programming language named C++. These systems have been debugged and tested with the representative set of problems. The results of the experiments were processed with statistical methods. High efficiency and expediency of application of self-adjusted genetic algorithm have been proved for solving of one criterion global optimization problems. The expediency of application of the developed modifications was shown for solving of various classes of optimization problems and intelligent data analysis in the previous researches.

Keywords: genetic algorithm, unconstrained, one-criterion optimization, classical methods, zero, first, second orders.

На текущий момент развития современной науки и техники, теории и практики существует разнообразный состав сложных задач оптимизации. В постановке задач могут участвовать несколько целевых функций, функционалов, критериев качества, алгоритмически и таблично заданных функций. Целевые функции могут не обладать свойствами унимодальности, выпуклости вверх или вниз, дифференцируемости, линейности и т. д. Ограничения задачи могут образовывать сложную разрывную допустимую область,

иметь нелинейный характер и т. д. Это является сложной научной проблемой для классических методов оптимизации.

Под оптимизацией в текущей работе рассматривается достижение минимума одной сложной функции без ограничений. В зависимости от условий, накладываемых на целевую функцию, существуют и применяются различные классы методов оптимизации, что является объектом исследования настоящей работы.

Формализованная постановка задачи безусловной однокритериальной оптимизации имеет следующий вид. Пусть существует одна целевая функция, оптимум которой необходимо определить. Под оптимумом в настоящей работе и во множестве книг по оптимизации понимается нахождение минимума. Это предположение является несущественным и применяется лишь для стандартизации рассуждений при рассмотрении различных методов. Задачу минимизации и задачу максимизации можно сводить друг к другу:

$$f(x) \rightarrow \text{opt},$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$ – вектор решений размерности n ; $f(x)$ – целевая функция (целевой функционал, критерий качества, алгоритм вычисления показателя качества).

Классические методы оптимизации. Существует классификация методов оптимизации по наличию информации о производных функции.

1. Методы нулевого порядка:

а) методы «золотого сечения», деления отрезка пополам, метод с использованием чисел Фибоначчи, квадратичная интерполяция, кубическая интерполяция для функций одной переменной;

б) метод Хука–Дживса, метод покоординатного спуска Гаусса–Зейделя, генетический алгоритм, последовательный симплексный метод, метод Нелдера–Мида (метод деформируемого многогранника) для функций n переменных.

Перечисленные методы используют в процессе оптимизации только значения функции в области значений и значения аргумента в области определения; они не используют значения производных первого, второго и n -го порядков. Все эти методы отлично изложены в источниках [1–3]. Они требуют от функции удовлетворения определенным условиям (например, унимодальная непрерывная выпуклая функция для метода деления отрезка пополам, деления отрезка в отношении «золотого сечения»).

2. Методы первого порядка (градиентные): градиентный метод с фиксированным шагом, градиентный метод с адаптивным шагом, градиентный метод, в котором шаг вычисляется на каждой итерации алгоритма и является решением одномерной задачи оптимизации (метод наискорейшего спуска по антиградиенту), градиентный метод с использованием теории планирования эксперимента (ортогональные планы первого порядка). Данные методы требуют существования первой производной оптимизируемой функции в аналитическом или численном приближенном виде (конечные разности). Данная группа методов использует информацию о направлении спуска к минимуму по антиградиенту, не настраивая при этом величину шага. Метод Флетчера–Ривса (поиск ведется вдоль взаимно сопряженных направлений) и Давидона–Флетчера–Пауэлла (необходима положительная определенность и симметричность матрицы вторых производных) наиболее быстро сходятся, если оптимизируемая функция квадратичная (для n переменных необходимо n шагов).

3. Методы второго порядка (ньютоновские методы) требуют существования первой и второй производной оптимизируемой функции (например, для вычисления матрицы Гессеана) в аналитическом или численном приближенном виде (конечные разности или ортогональное композиционное планирование второго порядка). Данная группа методов использует информацию о направлении спуска к минимуму по антиградиенту и информацию о выпуклости функций, настраивая при этом величину шага.

Если функция не дифференцируема, но является унимодальной, выпуклой и непрерывной, то возможно применение методов нулевого порядка. Методы оптимизации первого и второго порядков очень медленно сходятся вблизи окрестности оптимума, так как или градиент близок к нулю, или матрица вторых производных плохо обусловлена. Кроме того, данные методы сходятся не к глобальному оптимуму, а к ближайшему локальному экстремуму (т. е. очень зависят от выбора начальной точки), что недопустимо при решении многоэкстремальных задач ввиду существенной погрешности вычислений. Также градиентные методы медленно сходятся на овражных плохо масштабированных функциях.

Существует следующая классификация методов оптимизации:

1. Стохастические: метод стохастической аппроксимации градиента целевой функции, генетические алгоритмы в любой форме и модификации, глобальная оптимизация методом усреднения координат. Вероятностные методы используют элементы случайности, необходимые для поиска глобального оптимума. Стохастические методы являются псевдослучайными, так как в них используется машинный генератор случайных чисел, удовлетворяющий статистическим проверкам (но возможно применение аналогового генератора, например, связанного с измерением радиоактивности атомов).

2. Детерминированные: все остальные перечисленные в статье методы. В данном классе методов все процедуры поиска строго определены математическими формулами.

Генетические алгоритмы возникли в результате наблюдений за функционированием биологических систем. Идею генетических алгоритмов высказал Дж. Холланд в 1975 г. в своей книге «Адаптация в естественных и искусственных системах» [4]. Термин «генетические алгоритмы» ввел Д. Голдберг в 1975 г. [5]. В его книге описывается теория генетических алгоритмов и возможные сферы их применения.

«Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию методов решения проблем, и в первую очередь задач оптимизации. Генетические алгоритмы – процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей» [6, с. 125].

Модификация генетического алгоритма. В ходе проведения научных исследований с различными классическими методами оптимизации нулевого, первого и второго порядков и классическим генетиче-

ским алгоритмом была разработана новая самонастраивающаяся модификация генетического алгоритма в ходе решения задачи оптимизации.

Принципы функционирования самонастраивающегося генетического алгоритма:

1. Настройки выбираются случайным образом в соответствии с полученным дискретным распределением вероятностей.

2. Начальные вероятности равны $1/z$, где z – количество алгоритмов.

3. Через настраиваемое количество поколений s пересчитывается эффективность применяемых настроек (тем самым обеспечивается накопление статистической информации и адаптация алгоритма):

$$av_i = \frac{f_i}{n_i}, i = \overline{1, z},$$

где av_i – средняя пригодность порожденных потомков; f_i – общая пригодность индивидов, полученных i -м алгоритмом; n_i – количество индивидов, полученных i -м алгоритмом; z – количество алгоритмов.

4. Распределение вероятностей выбора настройки или сочетания настроек для формирования потомков на поколении, кратном s , изменяется в пользу более эффективных за счет менее эффективных:

$$m = \max(av_i), i = \overline{1, z},$$

$$P1 = + \frac{(z-1) \cdot K(g)}{z \cdot N},$$

$$P2 = - \frac{K(g)}{z \cdot N},$$

где m – максимальная средняя пригодность индивидов; $P1$ – увеличение вероятности выигравшего алгоритма; $P2$ – уменьшение вероятности остальных алгоритмов; N – число поколений; $K(g)$ – функция, зависящая от номера поколения g и осуществляющая взвешивание перераспределяемых вероятностей (рассматривалось несколько реализаций: $K(g) = \text{const}$, $K(g)$ – линейная функция, экспонента, гиперболическая функция и др., подбор параметров функции $K(g)$ осуществлялся статистическим анализом из условия обеспечения наилучших значений критериев эффективности модифицированного алгоритма в сравнении со стандартным алгоритмом).

5. Вероятности никогда не становятся равными нулю (осуществлялась настройка минимального значения вероятностей; согласно результатам проведенных экспериментов данное значение оказывает существенное влияние на надежность работы алгоритма и скорость сходимости).

6. Выполнение условия нормировки вероятностей.

Итак, выбор настроек осуществляется стохастическим образом в соответствии с полученным дискретным распределением вероятностей настроек в процессе решения задачи оптимизации, без использования априорной информации об эффективности операторов генетического алгоритма, о свойствах задачи и пространства поиска.

Программная реализация и эксперименты. В ходе проведения научных исследований были раз-

работаны программные системы на языке C++ (C++ Builder, см. рисунок), включающие классические и модифицированные алгоритмы оптимизации функций одной и многих вещественных переменных (для генетических алгоритмов применялась бинаризация). Разработанные программные системы были отлажены и протестированы на представительном множестве задач безусловной однокритериальной оптимизации (как унимодальные, монотонные, выпуклые функции, так и многоэкстремальные, недифференцируемые, овражные функции с множеством локальных нерегулярных оптимумов, слабо отличающихся от глобального, с протяженными оврагами в области оптимума, областями плато, разворотом функций относительно начала координат, нелинейностью, высокой размерностью до 100 вещественных переменных).

Усредненные результаты численных экспериментов (500, 1000 прогонов алгоритмов) обрабатывались с использованием непараметрических методов теории вероятностей и математической статистики (критерий Вилкоксона, ANOVA) для проверки статистической устойчивости в программной системе Statistica. Происходило вычисление и статистический анализ трёх критериев эффективности алгоритмов: надёжность, время работы, скорость сходимости.

Проведённый статистический анализ доказал непротиворечивость выдвинутых гипотез экспериментальным данным: гипотеза о равенстве законов распределения критериев эффективности алгоритмов в независимых тестах алгоритмов (по 500 или 1000 независимых случайных реализаций) с одинаковыми настройками не противоречит экспериментальным данным, гипотеза о сдвиге законов распределения отвергается.

Выполненная программная реализация и исследование классических методов прямого поиска для оптимизации унимодальных функций («золотое сечение», числа Фибоначчи, деление отрезка пополам, квадратичная интерполяция – для функций одной переменной, метод Хука–Дживса – для функций n переменных) позволили получить следующие результаты. Их нужно применять, если известно, что функция унимодальна, непрерывна, выпукла (так как сходимость детерминированного метода быстрее любого стохастического), но они не гарантируют получение глобального оптимума для многоэкстремальных функций. Метод разбиения отрезка в отношении «золотого сечения» (отношение длины всего отрезка к длине большей части равно отношению длины большей части к длине меньшей части) сходится быстрее, чем метод деления отрезка пополам. Метод поиска с помощью чисел Фибоначчи сходится быстрее, чем метод «золотого сечения».

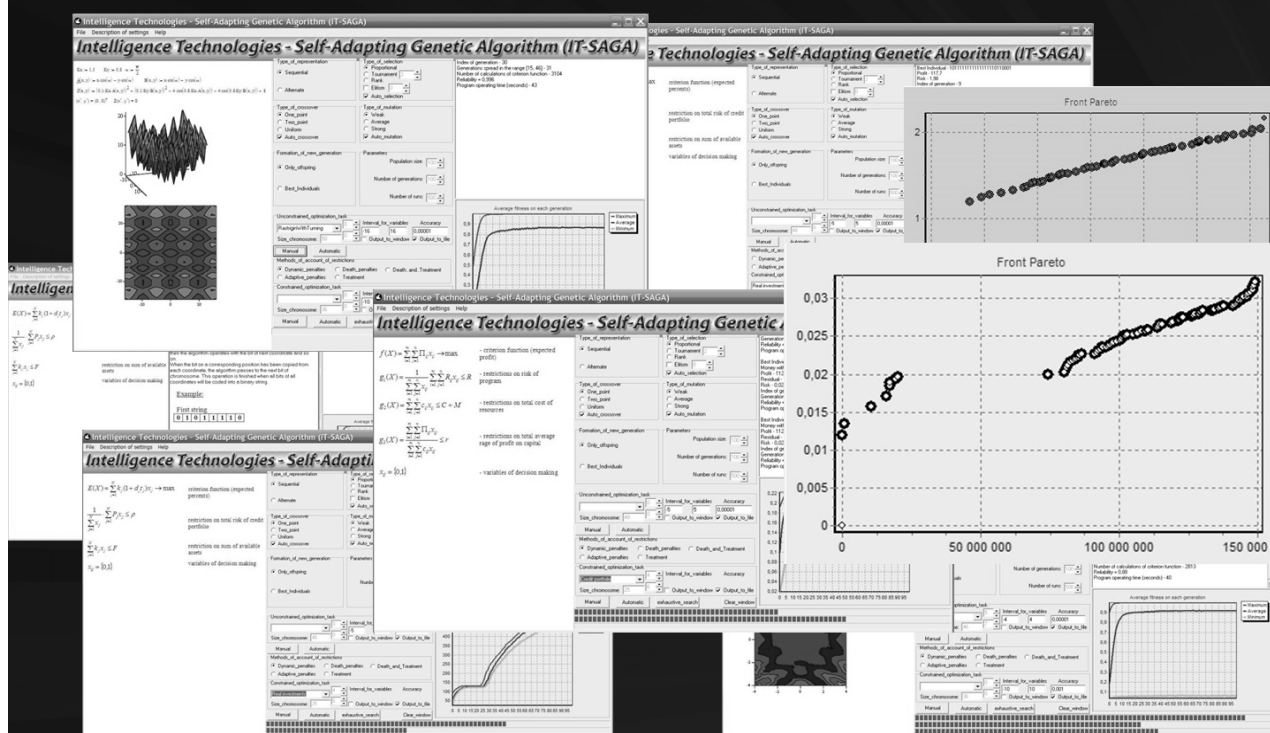
Итак, в случае отсутствия априорной информации о свойствах задачи, пространстве поиска необходимо пользоваться более универсальными стохастическими методами глобальной оптимизации, например, генетическим алгоритмом. Ввиду очень высокой трудоёмкости настройки классического генетического алгоритма (выбор настроек с локальным, глобальным или неопределённым характером схо-

димости) целесообразно использовать оригинальную разработанную в настоящей работе самонастраивающуюся модификацию генетического алгоритма, доказавшую высокую эффективность при решении различных классов задач оптимизации и интеллектуального анализа данных [7]: тестовые задачи безусловной и условной однокритериальной и многокритериальной оптимизации (в сочетании с методами SPEA и SPEA2), прикладные задачи условной однокритериальной и многокритериальной оптимизации,

задача проектирования и настройки искусственных нейронных сетей в виде моделей многослойных полносвязных перцептронов Розенблатта прямого распространения сигнала.

Авторы настоящей статьи выражают благодарность преподавательскому составу Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева за ценные советы, рекомендации, хорошую теоретическую подготовку.

Рабочие окна системы IT-SAGA



Некоторые рабочие окна программной системы IT-SAGA

Библиографические ссылки

1. Рубан А. И. Методы анализа данных : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.
2. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MathCad : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург : Лань, 2008. 352 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1988. 128 с.
4. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975. 96 p.
5. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Reading, MA Addison-Wesley, 1989.

6. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И. Д. Рудинского. М. : Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.

7. Звонков В. Б. Самоорганизующиеся эволюционные алгоритмы, искусственные нейронные сети и классические методы для интеллектуальных систем анализа данных : магистерская дис. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 179 с.

References

1. Ruban A. I. *Metody analiza dannykh* (Methods of data analysis). Krasnoyarsk, IPTs KGTU, 2004, 319 p.
2. Okhorzin V. A. *Prikladnaya matematika v sisteme MathCad* (Applied mathematics in the software system MathCad). St.-Petersburg, Lan', 2008, 352 p.

3. Bandi B. *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs* [Optimization Methods. Introductory course]. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 128 p.

4. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975, 96 p.

5. Goldberg D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Reading, MA Addison-Wesley, 1989.

6. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems). Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2006, 452 p.

7. Zvonkov V. B. *Magisterskaya dissertatsiya "Samoorganizuyushchiesya evolyutsionnye algoritmy, iskusstvennye neyronnye seti i klassicheskie metody dlya intellektual'nykh sistem analiza dannykh"* (Master's thesis in the direction of "System analysis and control" "Self-organizing evolutionary algorithms, artificial neural networks and classic methods for intelligent data analysis systems"). Sib. State. Aerospace. Univ. Krasnoyarsk, 2013, 179 p.

© Звонков В. Б., Попов А. М., 2013

УДК 004.3

СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ОПЫТНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ*

М. А. Казанцев

ОАО «Научно производственное предприятие «Радиосвязь»
Российская Федерация, 660021, Красноярск, ул. Декабристов, 19. E-mail: mkaz@mail.ru

Рассмотрено применение исполнительной системы производства на примере реализации системы диспетчеризации производства ОАО «НПП «Радиосвязь». Проанализировано применение существующих систем, решающих задачи управления производством предприятия. Выявлены требования, предъявляемые к системе диспетчеризации опытного и мелкосерийного производства современного предприятия радиоэлектронной аппаратуры. Описан опыт создания системы диспетчеризации опытного и мелкосерийного производства трех-уровневой архитектуры на базе веб-технологий. Подведены итоги внедрения системы диспетчеризации в работу ОАО «НПП «Радиосвязь», перечислен ряд преимуществ, которых удалось добиться после внедрения в работу такой системы.

Ключевые слова: исполнительная система, диспетчеризация, MES.

THE SYSTEM OF THE PILOT AND SMALL-SCALE PRODUCTION SCHEDULING OF THE RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

M. A. Kazantsev

JSC "Scientifically Radiosvyaz manufacturing enterprise"
19, Dekabristov str., Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation. E-mail: mkaz@mail.ru

In the present paper we give the description of the production executive system on the example of realization of the production dispatcher system of JSC NPP Radiosvyaz. The usage of the existing systems which can solve problems of the production management of the enterprise is analysed. The demands made to the system of the pilot and small-scale production scheduling of the modern enterprise of the radio-electronic equipment are revealed. The experience of the creation of the system of the pilot and small-scale production scheduling of three-level architecture on the basis of web technologies is described. The introductions of the scheduling system in JSC NPP Radiosvyaz work are summed up, a number of advantages which managed to achieve after introduction in work of such systems is listed.

Keywords: executive system, scheduling, MES.

Для современных машиностроительных предприятий основными являются задачи оперативного реагирования и принятия оптимального решения, что

возможно только при наличии адекватной системы управления предприятием [1].

* Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы по государственному контракту № 11411.1006800.11.319 от 05.12.2011 г.

Чтобы обеспечить конкурентоспособность, научно-производственные предприятия должны оперативно реагировать на потребности рынка, обеспечивать изготовление продукции в сроки, установленные в контрактах, проводить модернизацию изготавливаемой продукции, разрабатывать новые изделия и максимально быстро запускать их в серийное производство. Для обеспечения данных требований автоматизированная система управления предприятием должна способствовать выпуску продукции в соответствии с производственным планом, гибко реагировать на запуск в производство опытных образцов продукции, а также обеспечивать равномерную загрузку оборудования для своевременного выпуска деталей и сборочных единиц (ДСЕ) [2]. Задачи такого плана усложняются на предприятиях радиоэлектронной промышленности при малой серии, позаказном и опытном производстве. Это связано с тем, что сложные комплексы радиоэлектронных систем имеют длительные сроки изготовления, высокий уровень вхождений ДСЕ и зачастую, на этапе запуска в производство, имеют только маршрутную технологию. Все это приводит к тому, что на этапе производства добавляется большое количество изменений конструкторской и технологической документации и, как следствие, появляется большое количество производственных приказов, которые должны быть максимально быстро доведены до исполнителей для успешного выполнения производственных заказов и исключения затрат на изготовление деталей и блоков, снятых с производства. Для успешного выполнения заказов необходима возможность проведения анализа в различных разрезах и на разных этапах производства.

Одним из ведущих российских предприятий по разработке и серийному изготовлению наземных станций спутниковой и тропосферной связи, а также навигационных систем и комплексов является открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь». Предприятие обеспечивает разработку и серийное изготовление базовых станций спутниковой связи для систем Министерства обороны ЕССС-2 с учетом возможности широкого использования гражданских и коммерческих каналов связи [3; 4].

Все перечисленные факторы накладывают определенные требования к оперативному планированию производства такого предприятия, которые подчас недостаточно проработаны и реализованы в существующих системах.

Применение существующих систем, решающих задачи управления производством, таких как типовые версии «Гольфстрим» и «1С: Управление производственным предприятием», в условиях малой серии, позаказном и опытном производстве не обеспечивает всех необходимых функций.

Так, для системы «Гольфстрим», построенной на базе концепции MRP II (Manufacturing Resource Planning – планирование производственных ресурсов) с элементами APS (Advanced Planning & Scheduling – усовершенствованное планирование), на сегодняшний

день только планируется дополнение модулем MES (Manufacturing Execution System – производственная исполнительная система) [5]. Система «1С: Управление производственным предприятием» относится к классу ERP и обеспечивает только укрупненное планирование без функции диспетчеризации производства.

Как следствие, для данных систем потребуется большой объем доработок и есть сложность обновления до следующих релизов данных программных комплексов, что соизмеримо с разработкой собственной системы диспетчеризации производства. Кроме того, на предприятии ранее были разработаны и успешно применяются, начиная с 2003 г., следующие системы:

- учет движения товароматериальных ценностей;
- управление закупками;
- учет деталей и сборочных единиц;
- планирование производства.

Интеграция данных модулей со сторонними системами планирования производства также накладывает дополнительные трудности. Поэтому было принято решение разработать собственную систему диспетчеризации производства.

Для разработки системы диспетчеризации производства была выбрана трехуровневая архитектура на базе веб-технологий, что обеспечивает кроссплатформенность и низкие требования к производительности оборудования на уровне клиентских устройств, относительную легкость обновления и сопровождения программного обеспечения.

При проведении обследования предприятия радиоэлектронной промышленности (на примере ОАО «НПП «Радиосвязь») и анализа схем существующих бизнес-процессов управления производством (рис. 1) были выявлены основные требования к функциям разрабатываемой системы [6]:

- диспетчеризация производства – управление потоком изготавливаемых деталей по операциям, заказам, партиям, сериям, посредством рабочих нарядов;
- управление документами – контроль содержания и прохождения документов, сопровождающих изготовление продукции, ведение плановой и отчетной цеховой документации;
- отслеживание истории продукции – визуализация информации о месте и времени выполнения работ по каждому изделию. Информация должна включать отчеты: об исполнителях, технологических маршрутах, комплектующих, материалах, партийных и серийных номерах, произведенных переделках, текущих условиях производства и т. п.;
- сбор и хранение данных – взаимодействие информационных подсистем в целях получения, накопления и передачи технологических и управляющих данных, циркулирующих в производственной среде предприятия.
- анализ производительности – предоставление подробных отчетов о реальных результатах производственных операций. Сравнение плановых и фактических показателей.

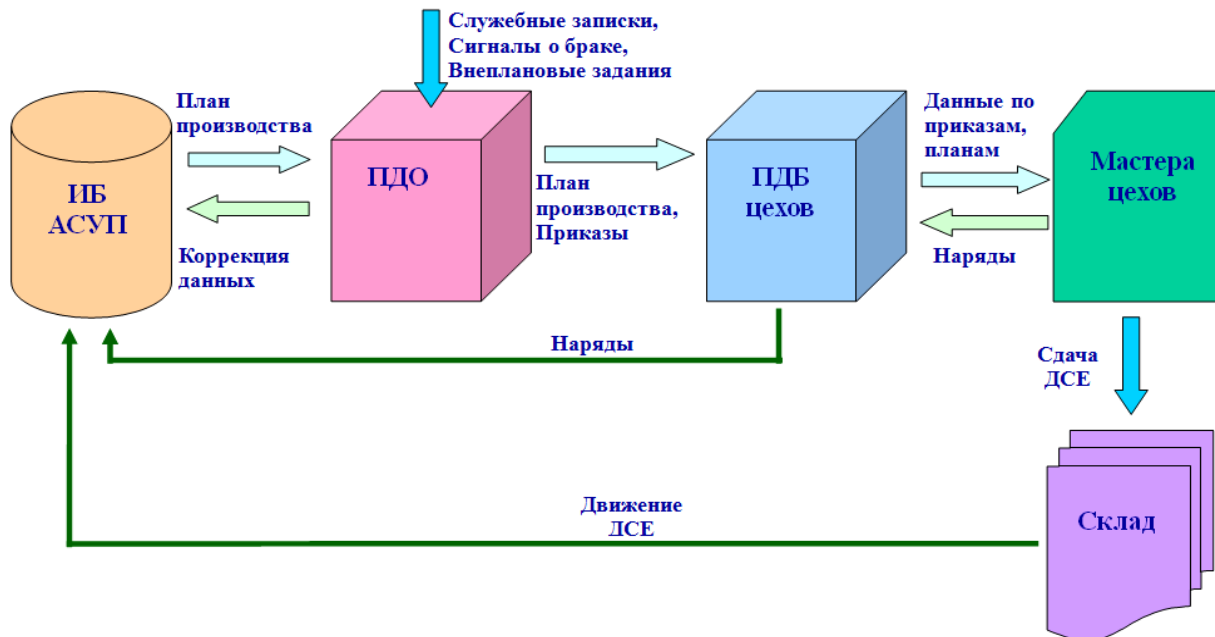


Рис. 1. Схема прохождения информации об изготавливаемых ДСЕ

Для увеличения достоверности информации, облегчения работы производственного отдела, начальников цехов и мастеров участков была разработана система диспетчеризации производства, которую, в свою очередь, можно разделить на 3 основных компонента:

- обработка и доведение планов, допланировок и приказов до участков производственных цехов;
- написание приказов;
- участковые планы.

Кроме того, данная система имеет глубокую интеграцию с системой складского учета предприятия. Например, для серийно изготавливаемых узловых станций спутниковой связи среднее количество наименований ДСЕ 7000 шт., общим количеством 100–110 тыс. шт., 2 000–3 000 наименований покупных комплектующих изделий и 2 000–3 000 наименований материалов с уровнем вхождения ДСЕ 15 и периодом изготовления 9 месяцев. Для данных изделий отработана технология изготовления и присутствует вся необходимая информация для планирования.

В качестве основы для работы системы диспетчеризации производства выступает номенклатурный план производства, полученный из системы АСУП предприятия. Содержимое плана включает перечень всех деталей и сборок планируемого изделия, цеховой маршрут изготовления каждой ДСЕ и ее трудоемкость. План формируется на заданный период времени (как правило, это квартал) с разбивкой по срокам изготовления, их может быть до четырех. Сроки выпуска каждой ДСЕ определяются в зависимости от трудоемкости ее изготовления и уровня ее вхождения в изделие.

План для последующей обработки спускается в производственно-диспетчерские бюро (ПДБ) цехов, в которых определяются участки изготовления ДСЕ и производится перенос информации о состоянии ДСЕ, находящихся в работе в данный момент, в новый уча-

стковый план. Для изделий рассмотренного типа работникам ПДО нужно только провести план, что займет не более 5 минут рабочего времени.

Мастера цехов работают с участковым планом (рис. 2), в котором присутствует вся необходимая информация для принятия решения об изготовлении конкретной ДСЕ. К такой информации относится: наличие материала, заготовки или входящих деталей на складе, срок, к которому должна быть изготовлена данная ДСЕ, количество по срокам и общая трудоемкость изготовления ДСЕ, цех-потребитель данной ДСЕ. Для срочных позиций предусмотрен специальный признак, который может быть автоматически выставлен на основании срочных приказов или в ручном режиме начальником цеха или мастером участка. Данная информация представлена в виде электронной таблицы с возможностью быстрого доступа к требуемым данным и для получения сопутствующих печатных форм, что значительно упрощает работу мастеров.

После принятия решения об изготовлении конкретной ДСЕ мастер цеха дает задание рабочему цеха. Если это первый цех по маршруту, то кроме производственного задания на основании технологической документации и плановой информации формируется сопроводительная карта (рис. 3, 4) на ДСЕ, которая сопровождает их по всему циклу изготовления. При выдаче рабочему необходимых материалов, заготовок или деталей в цеховой комплектации кладовщик на основании данного задания и штрих-кода рабочего (содержится в пропуске) производит списание со склада, и автоматически данным ДСЕ в участковом плане проставляется признак «в работе». Для сложного оборудования, такого как установка лазерного кроя, обрабатывающие центры и станки с ЧПУ, предусмотрены дополнительные статусы, позволяющие определить, на каком этапе изготовления находится ДСЕ.

ОАО «НПП «Радиосвязь»
Автоматизированные Системы
Управления Производством

Здравствуйте, Бехер ЭА

Реестр планов | Рабочий План | Участки | Приказы | Штрих-наряд | Выход

1001;.1005;.1013;.1023;.1024;.1025;.996;.996А; 1025;

Сохранить | Сопр. карты | Наряды | Кол. дел+ост. | Статус | ФИО | Убрать отметки | Показать отмеченны | Отчет | Реестр | Материал

Страница 1 из 86 (4278) | Перейти к странице | Размер страницы 50

О	Заказ	Т	Инд	Обозначение	Цех	Уч	Кол	О1	О2	О3	О4	Ост.	Ср	ФИО	С	По	Статус	Кол. дел.	Кому	Сд.	Дата	Приказы кол./номер	ТМ уч.
	233001	Н		16*70*1500	3	02		0	2			2										2 ;539;	02
	233001	Н		16*70*700	3	02		0	1			1										1 ;539;	02
	233001	Н		16*700*1500	3	02		0	1			1										1 ;539;	02
	203401	Б		Э4310-7482	3	02		0				0					Приостан.					0 ;;258;;683;	15
	203401	Д		Э4310-7507	3	02		0	1			1		Косогоров			В раб.	1				1 ;258;	14-02
	203401	Д		Э4310-7509	3	02		0	1			1		Косогоров			Не оконча	1			22.04.13	1 ;258;	14-02
	203401	Д		Э4310-7510	3	02		0	2			2		Косогоров			В раб.	2				2 ;258;	14-02
	203401	Д		Э4310-7563	3	02		0				0								2	15.04.13	2 ;;402;	45
	203401	Д		Э4310-7564	3	02		0	1			1										1 ;;402;	14-02
	203401	Д		Э4310-7568	3	02		0				0								2	16.03.13	2 ;;402;	14-02-45
	203401	Д		Э4310-7569	3	02		0				0								1	15.04.13	1 ;;402;	02-45
	203401	Д		Э4310-7570	3	02		0				0								1	15.04.13	1 ;;402;	02-45
	203401	Д		Э4310-7571	3	02		0				0					Сдано			1	15.03.13	1 ;402;	14-02
	203401	Д		Э4310-7576	3	02		0				0					Сдано			3	22.03.13	3 ;454;	14-02
	203401	Д		Э4310-7580	3	02		0				0					Сдано			1	20.03.13	1 ;454;	14-02
	203401	Д		Э4310-7581	3	02		0				0					Сдано			1	20.03.13	1 ;454;	14-02
	203401	Д		Э4310-7582	3	02		0				0					Сдано			1	20.03.13	1 ;454;	14-02
	203401	Б		Э4310-7583	3	02		0				0					Сдано			1	20.03.13	1 ;454;	02
	203401	Б		Э4310-7606	3	02		0				0					Сдано			1	30.03.13	1 ;529;	02
	203401	Д		Э4310-7607	3	02		0				0					Сдано			1	03.04.13	1 ;529;	14-02
	203401	Д		Э4310-7608	3	02		0				0					Сдано			1	03.04.13	1 ;529;	14-02

Рис. 2. Участковый план

Сопроводительная карта № 6342

ЭКРАН

ТМ:01-15

ТМ по пр.:

Приказы:



УЭ7070430

Заказ	План	Ост.	Дата	Контролер	Мастер
200114	256	24	20.05.2013		

ЭКРАН ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАГОТОВКИ: 5 НОРМА_РАСХОДА: 0.0029

БРОНЗА ЛЕНТА ДПРНТ 0.12X250 НД БР.Б2 ГОСТ1789-70

ТМ/Проф опер.	Наименование операции	ФИО рабочего	Количество/ дата	Контроль	Мастер/ Подпись
	Описание операции по техпроцессу				
03 / 588 0010	ОТРЕЗКА НА НОЖНИЦАХ				
03 / 653 0030	СЛЕСАРНАЯ				
44 / 768 0050	ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ				
01 / 755 0060	ТЕРМИЧЕСКАЯ				
03 / 653 0070	СЛЕСАРНАЯ				
44 / 768 0090	ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ				
01 / 755 0100	ТЕРМИЧЕСКАЯ				
44 / 058 0120	ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ				

3-44-1-3-44-1-44-47

Рис. 3. Сопроводительная карта для деталей

Сопроводительная карта № 6341		TM:02	
Заказ № 200114		Кол-во 0	
Б УЭ6875129		TM по пр.:	
Цех	Наименование	Приказы:	
Клей, компаунды, применяемые в процессе сборки (наименование)	План	Обозначение входящих материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий	Наименование входящих материалов, комплектующих изделий
Сборка	71	20	20.05.2013
Фамилия исполнителя	Подпись исполнителя	Фамилия мастера, подпись	
ТМ Проф	Наименование операции	ФИО рабочего	Количество
Дата	Контроль	Мастер/Подпись	
Описание операции по техпроцессу			
03/176 КОМПЛЕКТОВОЧНАЯ	0010	ЛИСТ 30152700452	2 0
15/540 РЕЦЕПТУРНАЯ	0020	ЛИСТ 32117600202	1 0
03/653 СЛЕСАРНО-СБОРОЧНАЯ	0030	УЭ4406004	2 0
44/265 МАЛЯРНАЯ	0050	УЭ6103099	1 0
		УЭ6177112	1 0
		УЭ8123060	4 0
		УЭ8953019-02	20 0
		УЭ9250332	2 0
		УЭ9250444	1 0

Рис. 4. Сопроводительная карта для сборочных единиц

Задание №		Бригада 15		на 68		Тип Н. Н.	
По серии		Исполнить до		Цех		Принят ОТК	
Выдано заготовок		68		5		68	
Отметки ОТК	Оп. уч.	Пр	Обозначение чертежа	Выполн. операц. проф. (с)	Таб. № рабочего пр. (по)	Код мастера В. О.	Перед. в цех %
1	Д		УЭ 7070430	10	70	06	3
Планировщик ПДБ				Штамп ОТК			
Нормировщик				Штамп цеха			
Мастер				Штамп цеха			
Дата				Штамп цеха			
18.01.13				Штамп цеха			

Накладная		Талон рабочего	
0.2833		15	
к заданию		к заданию	
Заказ	200114	Заказ	200114
Сдано в цех	3	Сдано в цех	3
УЭ 7070430		УЭ 7070430	
черте	68	черте	68
Штамп ОТК	19,2662	Штамп ОТК	19,2662
н-часы	сумма	н-часы	сумма
18.01.13		18.01.13	
сдал	дата	сдал	дата
сдал	дата	сдал	дата
Штамп цеха	подпись	Штамп цеха	подпись
Штамп цеха	подпись	Штамп цеха	подпись

Рис. 5. Наряд на выполнение работ

После выполнения задания рабочим, мастером участка в автоматизированной системе формируется «наряд» (рис. 5), который является основанием для начисления заработной платы рабочим. Для облегчения последующей обработки «нарядов» на них печатается штрих-код, считывание которого на каждом этапе изготовления ДСЕ позволяет автоматизировано проследить путь продвижения в производстве. Для мастеров, экономистов и начальников цехов предусмотрены сводные отчеты по объемам работ, выполненных рабочими подразделения за требуемый период времени.

Наряд на выполнение конкретных операций вместе с ДСЕ идет в следующий по маршруту цех, в котором кладовщик делает отметку о получении. Кроме того, наряд проходит ПДБ цеха, в котором все проходящие наряды сканируются для контроля прохождения и ускорения обработки следующих участков планов. После обработки в ПДБ наряды передаются в АСУП.

Кроме плановых позиций, для опытного производства характерно большое количество внеплановых заданий, служебных записок в дополнение и изменение плана и отсутствие необходимой информации для запуска ДСЕ в производство. Данная проблема решается в модуле «Написание приказов». В этом модуле работники ПДО на основании входящих документов формируют производственные приказы, в которых

указывается вся необходимая для изготовления ДСЕ информация, такая как маршрут изготовления и необходимые материалы. Для ДСЕ, информация на которые присутствует в информационной системе предприятия, реквизиты заполняются автоматически, а для новых ДСЕ эти реквизиты заполняются на основании данных отдела главного технолога. Приказы могут быть как на увеличение, так и на уменьшение плана, а также на изменение технологии производства. Кроме того, в рамках работы производственного плана возможны допланировки (запуск в производство новых заказов в период действия текущего плана). Допланировки и приказы также проходят через ПДБ, которое, в свою очередь, спускает их до участков цехов.

Так, для разрабатываемой перспективной станции, комбинирующей в своем составе комплекс тропосферной и спутниковой связи, через планы было доведено 860 наименований ДСЕ. Остальная часть ДСЕ была проведена через производственные приказы и содержала 659 наименований.

После внедрения системы диспетчеризации производства на ОАО «НПП «Радиосвязь» значительно увеличилась прозрачность и достоверность получения информации о состоянии производства ДСЕ, уменьшился объем бумажного документооборота. Также облегчилась работа мастеров, связанная с принятием решения о начале изготовления ДСЕ и выдаче сопроводительной документации. За счет внедрения систе-

мы ПДО получило эффективные механизмы своевременного доведения информации об изменении состава изделий до исполнителей. Как следствие, был минимизирован риск изготовления ДСЕ, выведенных из конструкторской документации. Все это в совокупности помогает обеспечить выполнение производственных планов в установленные сроки.

Библиографические ссылки

1. Загидуллин Р. Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP : монография. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.
2. Васин С. А., Пушкин А. Н., Иноземцев А. Н. Выбор оптимального решения при проектировании межцеховых технологических маршрутов // СТИН. 2002. № 10. С. 3–6.
3. Галеев Р. Г. Станции спутниковой и тропосферной связи ФГУП «НПП «Радиосвязь» // Связь в Вооруженных силах Российской Федерации. 2010. Вып. 5. С. 136–137.
4. Галеев Р. Г., Гребенников А. В., Казанцев М. Ю. Синхронизация шкал времени комплексов радиосвязи по сигналам ГЛОНАСС/GPS // Связь в Вооруженных силах Российской Федерации. 2012. Вып. 7. С. 150–152.

5. Бонакер С. Система автоматизированного управления ГОЛЬФСТРИМ в фокусе – производство // Стремление. 2012. № 3 (10). С. 28–33.

6. Фролов Е. Б., Загидуллин Р. Р. MES-системы, как они есть или эволюция систем планирования производства // Генеральный директор. 2008. № 4. С. 84–91.

References

1. Zagidullin R. R. *Upravlenie mashinostroitel'nyy proizvodstvom s pomoshh'yu sistem MES, APS, ERP* (Management of machine-building production by means of MES, APS, ERP systems: monograph), Stary Oskol, TNT, 2011, 372 p.
2. Vasin S. A., Pushkin A. N., Inozemthev A. N. *STIN*, 2002, № 10, p. 3–6.
3. Galeev R. G. *Svjaz' v Vooruzhennyh silah Rossijskoj Federacii*, 2010, vol. 5, p. 136–137.
4. Galeev R. G., Grebennikov A., Century, Kazantsev M. Yu. *Svjaz' v Vooruzhennyh silah Rossijskoj Federacii*. 2012, vol. 7, p. 150–152.
5. Bonaker S. *Stremlenie*. 2012. № 3(10), p. 28–33.
6. Frolov E. B., Zagidulin R. R. *General'nyj direktor*. 2008. № 4, p. 84–91.

© Казанцев М. А., 2013

УДК 544.1, 544.18

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СВЯЗЫВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА АКТИВНЫМ ЦЕНТРОМ [NiFe]-ГИДРОГЕНАЗЫ*

Д. С. Калякин¹, С. А. Варганов¹, А. О. Лыхин^{1,2}, А. А. Кузубов^{1,2}, П. О. Краснов¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: dskalyakin@mail.ru, alexandr_lykhin@mail.ru

Объектом данного исследования является активный центр [NiFe]-гидрогеназы. Гидрогеназы вызывают повышенный интерес исследователей ввиду возможности их использования для модификации поверхности электродов с целью каталитического окисления и восстановления водорода. Исследовано связывание H₂ с активным центром [NiFe]-гидрогеназы с помощью методов теории функционала плотности. Определены энергии связывания H₂ с атомами железа и никеля. Показано пересечение между кривыми потенциальной энергии синглетного и триплетного состояний системы, состоящей из активного центра [NiFe]-гидрогеназы и связанного с ним молекулярного водорода. Результаты работы указывают на то, что механизм связывания молекулярного водорода с активным центром [NiFe]-гидрогеназы может носить неадиабатический спин-запрещенный характер. В связи с этим, для создания эффективного катализатора основанного на структурных моделях гидрогеназы, необходимо создавать бионеорганические комплексы, способные к изменению своих спиновых состояний в процессе катализа.

Ключевые слова: гидрогеназа, спин-запрещенные реакции, адиабатический и неадиабатический процессы, теория функционала плотности (DFT).

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0916.

QUANTUM-CHEMICAL STUDY OF MOLECULAR HYDROGEN BINDING ON [NiFe]-HYDROGENASE ACTIVE SITE

D. S. Kaliakin¹, S. A. Varganov¹, A. O. Lykhin^{1,2}, A. A. Kuzubov^{1,2}, P. O. Krasnov¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation.
E-mail: dskalyakin@mail.ru, alexandr_lykhin@mail.ru

This work is focused on the active site of [NiFe]-hydrogenase. The wide interest in hydrogenases is explained by their potential application in catalytic oxidation and reduction of molecular hydrogen. In this work the H₂ binding to the active site of [NiFe]-hydrogenase is studied using density functional theory methods. The binding energies of H₂ to the iron and nickel centers are found. The intersection between the potential energy curves of the singlet and triplet states of the [NiFe]-hydrogenase active site, with molecular hydrogen bound to it, is demonstrated. The results of this work show that the molecular hydrogen binding to [NiFe]-hydrogenase active site has nonadiabatic spin-forbidden character. Therefore, to create an efficient catalyst based on hydrogenase structural models, it is essential to create bioinorganic complexes capable of changing their spin states during catalytic process.

Keywords: hydrogenase, spin-forbidden reactions, adiabatic and nonadiabatic processes, density functional theory (DFT).

Постоянный рост цен на традиционные энергоносители и ущерб, наносимый окружающей среде в ходе их использования, делает актуальными исследования, направленные на поиск новых, более эффективных и экологически чистых энергоносителей. В роли одного из них выступает молекулярный водород. Однако на данный момент массовое использование данного энергоносителя является экономически нецелесообразным из-за высокой стоимости производства молекулярного водорода [1].

Одним из способов снижения затрат при производстве водорода может быть использование функциональных моделей гидрогеназы в качестве катализаторов. Гидрогеназы относятся к классу энзимов, способных катализировать процессы окисления и восстановления водорода:



Каталитическое окисление водорода с использованием гидрогеназы применимо для создания топливных ячеек, которые в будущем могут стать основой для преобразования химической энергии в электрическую [2]. Большое значение приобретают представления о функционировании гидрогеназ также в рамках материаловедения, в частности, при разработке материалов электродов фотобиокаталитических систем на основе наноструктурированных мезопористых пленок TiO₂, поверхность которых модифицирована иммобилизованными ферментами [3]. Основные типы гидрогеназ – это [NiFe]-гидрогеназа [4], [FeFe]-гидрогеназа [5] и [Fe]-гидрогеназа [6]. Наиболее перспективной среди них является [NiFe]-гидрогеназа ввиду того, что это единственный тип гидрогеназы, сохраняющий каталитическую активность в присутствии кислорода [7]. При выделении гидрогеназы из бактерии-носителя данный энзим становится нестабильным и теряет свою каталитическую активность после нескольких каталитических циклов. В послед-

нее десятилетие был синтезирован ряд соединений, имитирующих активный центр [NiFe]-гидрогеназы. Существует два класса таких соединений. К первому классу относятся структурные модели гидрогеназы [8], ко второму – функциональные модели гидрогеназы [9]. Все ранее созданные функциональные модели активны лишь в электрохимических условиях, что значительно снижает спектр их возможного применения [10]. Вместе с тем, показано, что структурные модели [NiFe]-гидрогеназы не проявляют каталитической активности [11]. В этой связи важным направлением исследований является определение положения связывания молекулярного водорода, рассмотрение механизма его расщепления, а так же факторов, влияющих на эти процессы. Выяснение положения связывания H₂ является первоочередным для объяснения каталитического механизма, так как данный процесс является начальной стадией каталитического цикла.

При изучении свойств активного центра гидрогеназы были использованы модели структур синглетного и триплетного состояний активного центра, в которых цистеиновые фрагменты были заменены на тиометильные группы (рис. 1).

На начальном этапе была проведена предварительная оптимизация геометрии комплекса без водорода. Затем, связывание H₂ было изучено посредством оптимизации геометрий структур с различными начальными положениями водорода (рис 2). Они были выбраны на основании исследований, проведенных ранее, указывающих на то, что наиболее вероятными являются положения молекулярного водорода на атоме железа, никеля, а также мостиковое положение между двумя металлами [12–15]. В ходе расчетов рассматривались всевозможные варианты ориентации H₂ относительно комплекса. Оптимизация геометрических параметров комплекса со связанным водородом проводилась до достижения минимального значения

энергии, что соответствует образованию устойчивой системы. Таким образом, были определены наиболее выгодные конформеры, которые были рассмотрены в дальнейших расчетах.

Оптимизация геометрий представленных структур была осуществлена методами теории функционала плотности B3LYP [16; 17], TPSS [18], PBE [19] с использованием базисного набора функций bs1, состоящего из штудгартского базиса в комбинации с эффективным потенциалом остова ECP10MDF для атомов железа и никеля [20], и набора базисных функции 6-31G(d, p) для других атомов [21]. Данный набор базисных функций показал хорошее соответствие полученных геометрий с экспериментальными величинами при исследовании каталитического цикла с участием H_2 в синтетических комплексах с одиночным никелевым центром [22].

Результаты работы свидетельствуют о том, что связывание молекулярного водорода происходит лишь на атоме железа, как в синглетном, так и триплетном состоянии активного центра. Вращение метильных групп приводит к появлению двух конформеров с различной энергией сорбции. Данный эффект наблюдается как для синглетного ($s = 0$), так и для триплетного состояний ($s = 1$) (рис. 3).

После оптимизации геометрий и расчета энергий связывания водорода с использованием набора базисных функций bs1, полученные энергии связывания были уточнены при помощи расчетов с использованием набора базисных функций def2-TZVP [23]. Для получения наиболее точной энергии были проведены расчеты энергии нулевых колебаний. Учет данной поправки является крайне важным для систем с большим количеством внутренних координат, в число которых входит активный центр [NiFe]-гидрогеназы со связанным с ним водородом. Расчет энергии связывания проводился по следующей формуле:

$$E_{\text{связывания}} = E_{\text{АЦ+H}_2} - E_{\text{АЦ}} - E_{\text{H}_2}, \quad (2)$$

где $E_{\text{связывания}}$ – энергия связывания; $E_{\text{АЦ+H}_2}$ – полная энергия активного центра со связанным водородом; $E_{\text{АЦ}}$ – полная энергия активного центра; E_{H_2} – полная энергия молекулы водорода.

Отрицательные значения энергии связывания свидетельствуют об энергетической выгоде присоединения водорода. Положительные энергии присущи системам в метастабильном состоянии. Энергии связывания H_2 на активном центре гидрогеназы для синглетного (рис. 4) и триплетного (рис. 5) состояний активного центра представлены ниже.

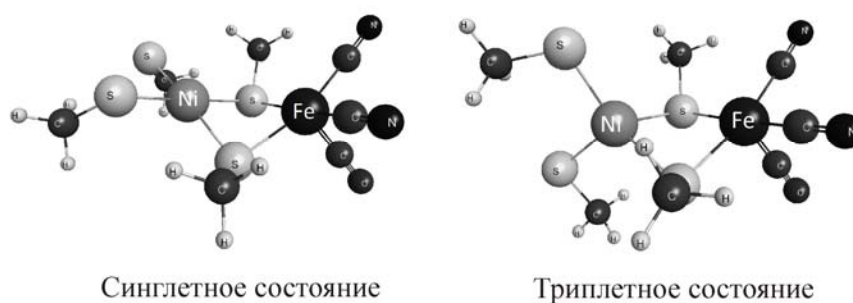


Рис. 1. Модельные структуры синглетного и триплетного состояний гидрогеназы

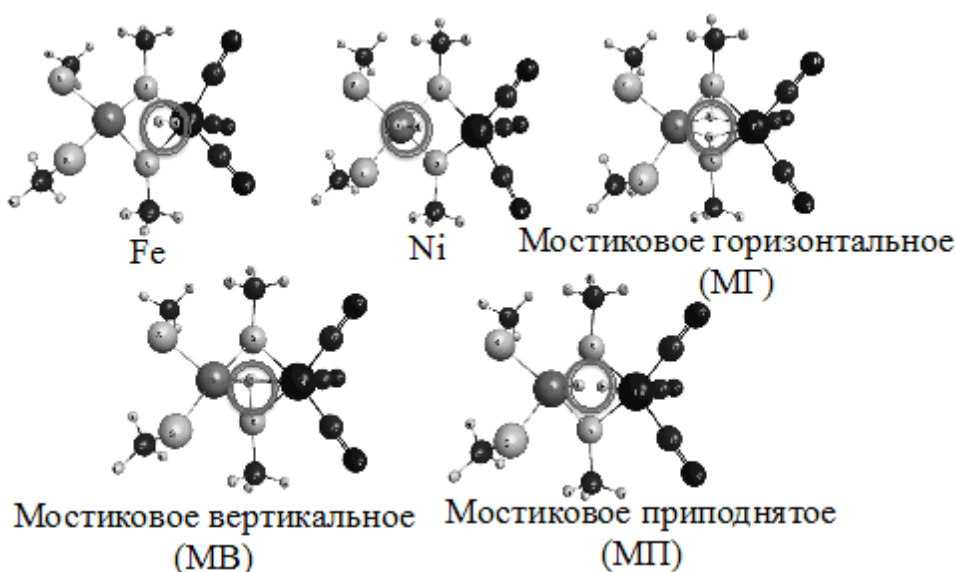


Рис. 2. Начальные положения молекулярного водорода, использованные в ходе геометрической оптимизации: эллипсы на рисунке показывают положения связанного водорода

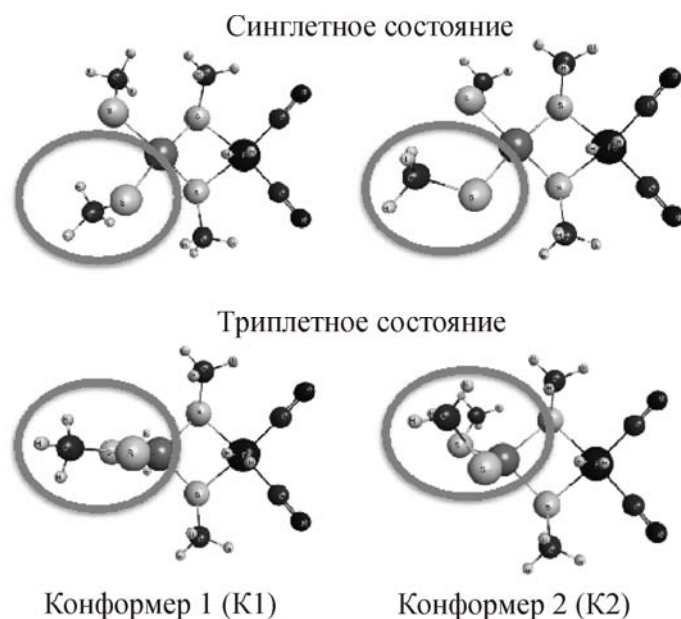


Рис. 3. Конформеры полученные в ходе оптимизации геометрии активного центра со связанным водородом: эллипсы на рисунке показывают основные отличия конформеров между собой

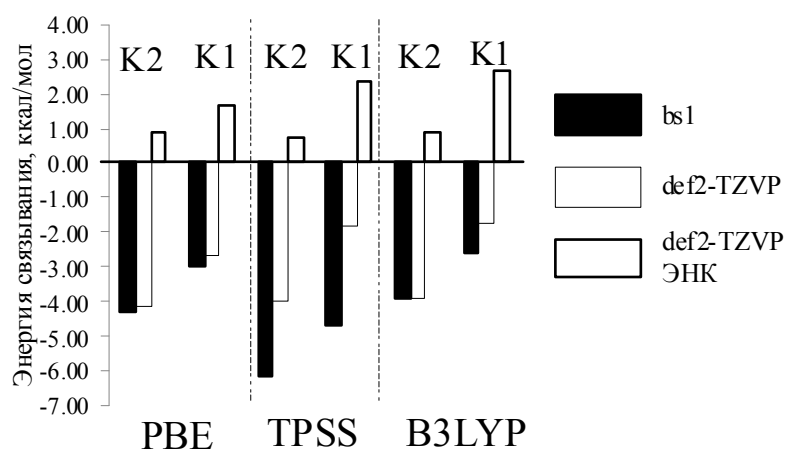


Рис. 4. Энергия связывания H_2 на активном центре гидрогеназы в синглетном состоянии

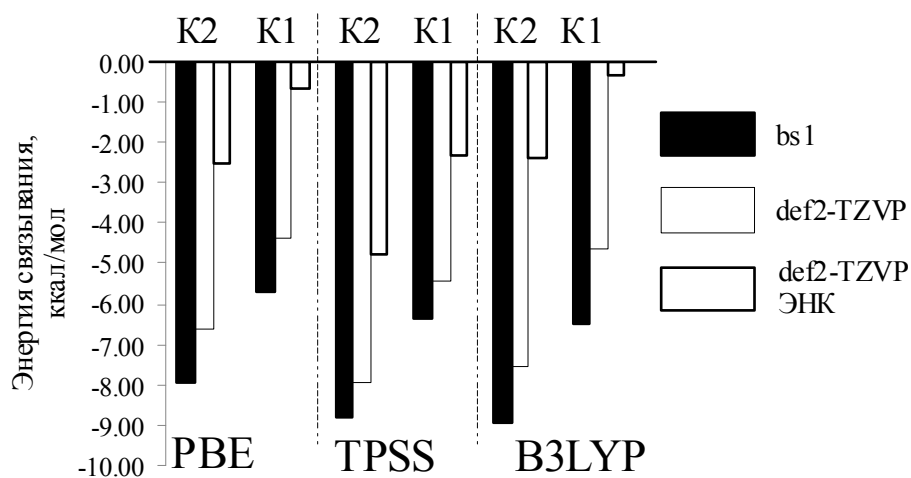


Рис. 5. Энергия связывания H_2 на активном центре гидрогеназы в триплетном состоянии

Из приведенных данных видно, что энергия связывания молекулярного водорода всегда остается выше для второго конформера (K2). Данный тренд сохраняется для всех методов и поправок, как для синглетного, так и для триплетного состояний активного центра гидрогеназы. Тем не менее, после учета всех поправок было выявлено, что связывание водорода на активном центре в синглетном состоянии гораздо слабее, чем связывание в триплетном состоянии.

После выявления положения связывания молекулярного водорода на активном центре гидрогеназы и установления энергии связывания были исследованы непосредственно механизмы связывания H_2 . Как было упомянуто ранее, ни одна из структурных моделей гидрогеназы не способна участвовать в каталитическом процессе. Причиной этого может служить то, что все искусственные модели гидрогеназы, созданные ранее, могут иметь только одно спиновое состояние, в то время как в природе активный центр способен постоянно изменять его. Данный эффект можно объяснить присутствием переходных металлов $Fe^{2+} d^6$ и $Ni^{2+} d^8$ в структуре активного центра.

Согласно теории кристаллического поля, атом Fe в рассматриваемом комплексе не может менять свое спиновое состояние ввиду того, что он окружен двумя CN^- и одной CO -группами, являющимися лигандами сильного поля и вызывающими большое расщепление d-орбиталей. Этот факт делает атом железа предпочтительным центром связывания. Центром, который может менять свое спиновое состояние в данном комплексе, является атом Ni. Изменение спинового состояния Ni приводит к перераспределению электронной плотности, что, в свою очередь, влияет на энергию связывания молекулярного водорода на атоме железа.

В результате воздействия протеиновых цепей, окружающих активный центр, лиганды вокруг атома никеля способны вращаться, меняя геометрию комплекса с плоскостной на тетраэдрическую (рис. 6). Изменения в положении лигандов вокруг атома никеля приводят к изменению спинового состояния и иному расщеплению d-орбиталей.

Данный процесс, характерный для модели активного центра, представляется ключевым в объяснении каталитической активности природной гидрогеназы. Иными словами, связывание водорода может являться неадиабатическим спин-запрещенным процессом, в ходе которого система, находящаяся вначале в одном спиновом состоянии, претерпевает его изменение в ходе реакции. Кристаллическая структура активного центра $[NiFe]$ -гидрогеназы, полученная методом рентгеновской дифракции, свидетельствует о том, что атом Ni находится в окружении лигандов занимающих промежуточное положение между плоскоквадратным и тетраэдрическим. Данный факт косвенно подтверждает возможность постоянного изменения геометрии активного центра гидрогеназы [24].

Путь реакции неадиабатического связывания молекулярного водорода может быть выражен через торсионный угол ϕ , описывающий вращение плоскости, образованной двумя лигандами атома никеля, относительно плоскости, образованной двумя другими лигандами (рис. 6). В ранее опубликованной работе было продемонстрировано пересечение кривых потенциальной энергии триплетного и синглетного состояний активного центра [25]. Однако для того, чтобы доказать неадиабатический характер связывания H_2 на активном центре гидрогеназы, необходимо показать, что такое пересечение существует и для системы, состоящей из активного центра и связанного с ним молекулярного водорода.

Для изучения кривых потенциальной энергии синглетного и триплетного состояний активного центра гидрогеназы со связанным с ним молекулярным водородом было использовано два различных подхода к симуляции искажения геометрии активного центра. В соответствии с первым подходом фиксировалось значение угла ϕ и проводилась последующая оптимизация геометрии каждой точки на пути перехода из плоскоквадратной структуры в тетраэдрическую. Вторым подход заключался в использовании фиксированных положений атомов углерода с последующей геометрической оптимизацией для каждой точки (рис. 7).

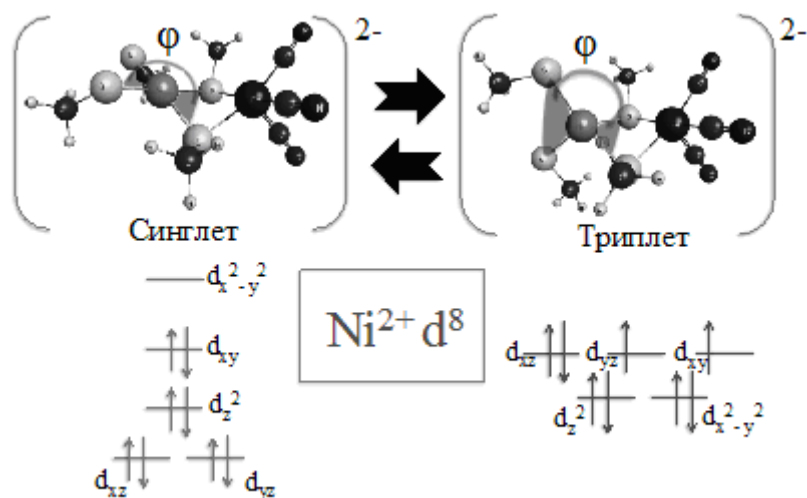


Рис. 6. Изменение геометрии активного центра гидрогеназы с плоской-квадратной на тетраэдрическую и соответствующее расщепление d-орбиталей

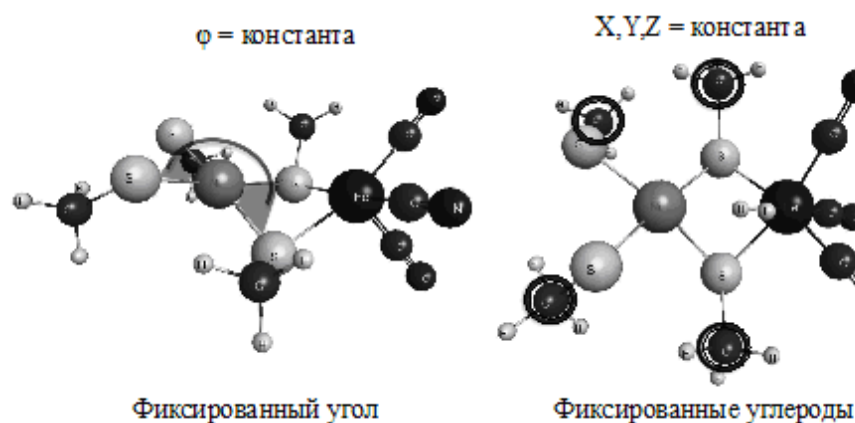


Рис. 7. Подходы, использованные для описания искажения геометрии активного центра, вследствие влияния протеиновых цепей

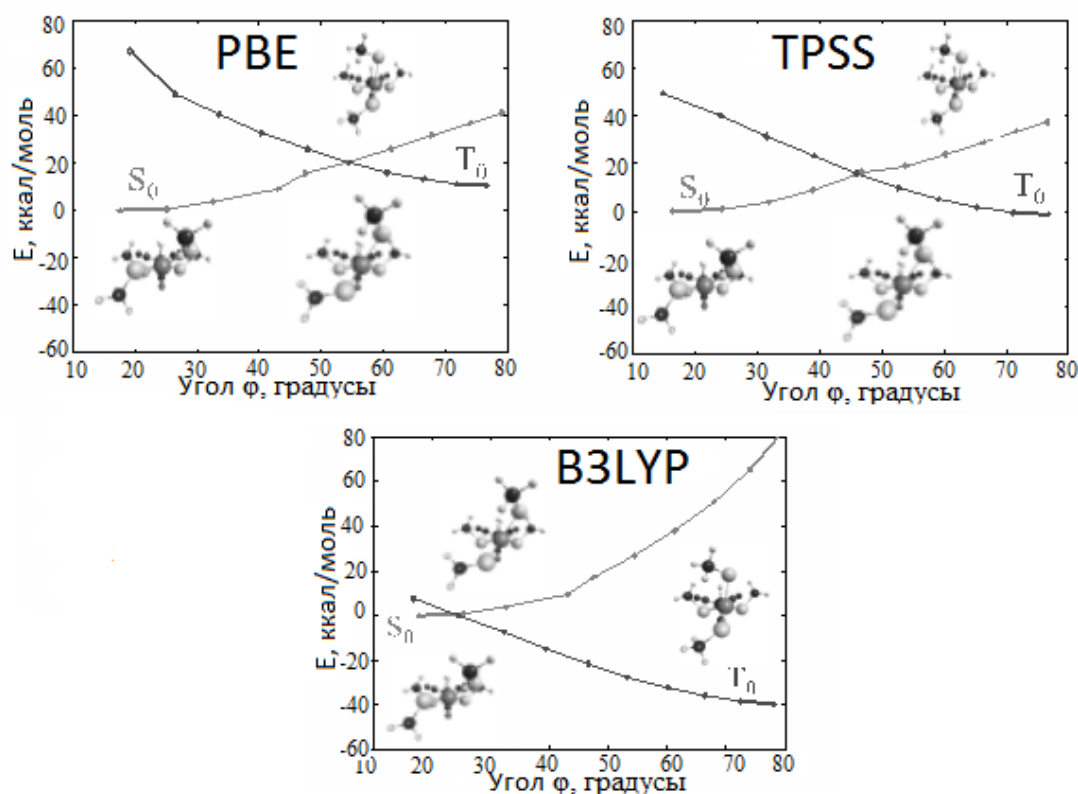


Рис. 8. Кривые потенциальной энергии, рассчитанные методами DFT в приближении фиксированного угла

В ходе изучения кривых потенциальной энергии синглетного и триплетного состояний активного центра гидрогеназы со связанным с ним H_2 в приближении фиксированного угла, было выявлено, что все использованные методы теории функционала плотности показывают пересечение кривых потенциальной энергии синглетного и триплетного состояний. Это подтверждает возможность неадиабатического спин-запрещенного характера процесса связывания водорода.

Результаты расчетов методом TPSS хорошо согласуются с расчетами методом PBE, который, в свою очередь, положительно зарекомендовал себя в исследованиях комплексов, содержащих атом никеля

[22]. Однако следует отметить, что несмотря на согласованность между функционалами TPSS и PBE в предсказании угла, соответствующего точке пересечения кривых с минимальным значением энергии ($\approx 50-55^\circ$), B3LYP предсказывает значение, отличное от результата этих методов ($\approx 25-30^\circ$) (рис. 8), поскольку качественно отличается от них наличием поправки к обменной энергии, основанной на методе Хартри–Фока. Причиной скачков энергии на приведенных графиках является изменение положения тиометильных групп, что приводит к вращению свободных электронных пар, локализованных на атомах серы.

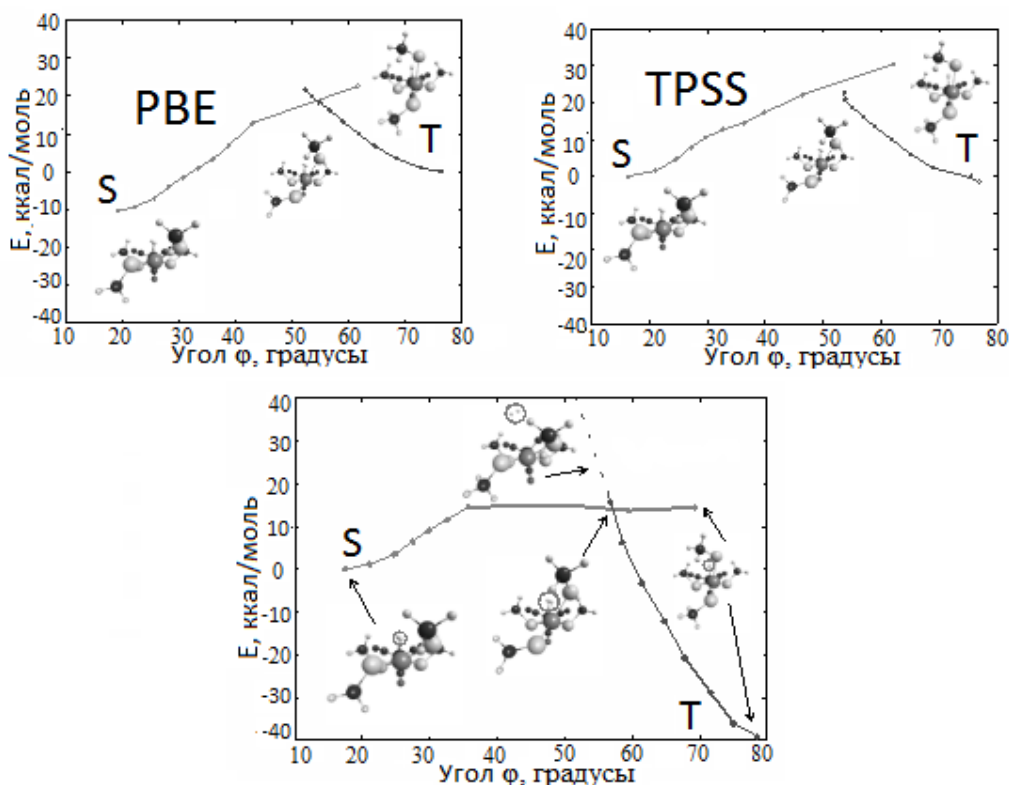


Рис. 9. Кривые потенциальной энергии, рассчитанные методами DFT в приближении фиксированных атомов углерода

В ходе изучения кривых потенциальной энергии в приближении фиксированных атомов углерода было отмечено два важных факта. Во-первых, несмотря на то, что расчеты методами PBE и B3LYP показывают пересечение потенциальных кривых, результаты расчетов методом TPSS демонстрируют его отсутствие. Этот факт, вероятнее всего, обусловлен особенностями метода TPSS, относящегося к классу методов метаобобщенного градиентного приближения, что приводит к переоценке энергии синглетного состояния. Во-вторых, метод B3LYP предсказывает не только возможность перехода между двумя состояниями, но и десорбцию водорода при достижении критического угла $\phi \approx 57^\circ$. Более того, расчеты, полученные в приближении фиксированного угла, достаточно хорошо согласованы с результатами, полученными в приближении фиксированных атомов углерода (рис. 9). Также большинство данных хорошо согласуется с расчетами методом PBE, являющимся наиболее достоверным для данного типа систем. Обобщенный анализ полученных в работе данных приводит к единому выводу о характере связывания молекулярного водорода на активном центре [NiFe]-гидрогеназы.

Результаты данной работы указывают на то, что процесс связывания водорода на активном центре [NiFe]-гидрогеназы носит неадиабатический спин-запрещенный характер. Данный факт может быть использован для объяснения каталитического механизма реакций окисления и восстановления водорода на активном центре гидрогеназы. Более того, выявлен-

ные результаты указывают на то, что для создания эффективного катализатора, основанного на структурных моделях гидрогеназы, необходимо создавать такие структуры, которые способны к постоянному изменению своего спинового состояния.

References

1. Bartels J. R. et. al. *Int. J. Hydrogen Energ.* 2010, 35, 8371–8384.
2. Lojou E. *Electrochimica Acta.* 2011, 56, 10385–10397.
3. Andreiadis E. S.; Chavarot-Kerlidou M.; Fontecave M.; Artero, V. *Photochem. & Photobiol.* 2011, 87, 946–964.
4. Albracht S. P. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics.* 1994, 1188, 167–204.
5. Adams M. W. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics.* 1990, 1020, 115–145.
6. Thauer R. K., Klein A. R., Hartmann, G. C. *Chem. Rev.* 1996, 96, 3031–3042.
7. Buhrke T. *Journal of Biological Chemistry.* 2005, 280, 23791–23796.
8. Ohki Y. et. al. *PNAS.* 2008, 105, 7652–7657.
9. Helm M. L. et. al. *Science* 2011, 333, 863–866.
10. Barton B. E., Whaley C. M., Rauchfuss T. B., Gray D. L. *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131, 6942–6943.
11. Ohki Y., Tatsumi K. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2011, 7, 973–985.
12. Ogata H. et. al. *J. Am. Chem. Soc.* 2002, 124, 11628–11635.

13. Pardo A., Lacey A. L., Fernández V. M., Fan H.-J., Fan Y., Hall M. B. *J Biol Inorg Chem* 2006, 11, 286–306.
14. Wu H., Hall M. B. *Comptes Rendus Chimie* 2008, 11, 790–804.
15. Siegbahn P. E. M., Tye J. W., Hall M. B. *Chem. Rev.* 2007, 107, 4414–4435.
16. Perdew J. P., Burke J., Ernzerhof M. *Phys. Rev. Lett.* 1996, 77, 3865.
17. Becke A. D. *J. Chem. Phys.* 1993, 98, 5648.
18. Stephens P. J., Devlin F. J., Chabowski C. F., Frisch M. J. *J. Phys. Chem.* 1994, 98, 11623.
19. Tao J., Perdew J., Staroverov V., Scuseria G. *Phys. Rev. Lett.* 2003, 91, 146401.
20. Dolg M. et. al. *Chem. Phys.* 1987, 86, 866–872.
21. Rassolov V. A. et. al. *J. Chem. Phys.* 1998, 109, 1223–1229.
22. Chen S., Raugei S., Rousseau R., Dupuis M., Bullock R. M. *J. Phys. Chem.* 2010, 114, 12716.
23. Weigend F., Ahlrichs R. *PCCP.* 2005, 7, 3297.
24. Fan H. J., Hall M. B. *J. Am. Chem. Soc.* 2002, 124, 394–395.
25. Yson R. L., Gilgor J. L., Guberman B. A., Varganov S. A. *Chem. Phys. Lett.* 2013, 577, 138–141.

© Калякин, Д. С., Варганов С. А., Лыхин А. О.,
Кузубов А. А., Краснов П. О., 2013

УДК 004.021

ПОСТРОЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ СЛОВАРЕЙ НА ОСНОВЕ ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕММАТИЗАЦИИ

И. В. Ковалев, А. И. Середин, М. В. Карасева, П. В. Зеленков, В. В. Храпунова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: alexzanderIV@yandex.ru

Рассматривается вопрос снижения трудоемкости изучения информационно-терминологического базиса за счет уменьшения объема частотного словаря, на основе которого строится базис. Рассматривается вопрос построения частотных словарей на основе исходных текстов с применением лемматизации для последующего формирования информационно-терминологического базиса. Приводится алгоритм построения частотного словаря на основе исходных текстов с применением лемматизации, а также модификация данного алгоритма с использованием проверки терминов формируемого частотного словаря по специализированному словарю.

Ключевые слова: частотный словарь, информационно-терминологический базис, лемматизация.

FREQUENCY DICTIONARY CONSTRUCTION BASED ON THE SOURCE TEXT USING LEMMATIZATION

I. V. Kovalev, A. I. Seredin, M. V. Karaseva, P. V. Zelenkov, V. V. Khrapunova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: alexzanderIV@yandex.ru

The issue of reducing the complexity of the information-vocabulary basis study by decreasing the amount of the frequency dictionary (on which base the basis is constructed), is considered. The frequency dictionary construction based on the source text using lemmatization for the subsequent formation of information-vocabulary basis is considered. The algorithm for frequency dictionary construction based on the source text using lemmatization is presented, as well as the modification of this algorithm with checking the terms of the generated frequency dictionary by a specialized dictionary.

Keywords: frequency dictionary, information-vocabulary basis, lemmatization.

В соответствии с работами [1–2], занимающимися решением задачи формирования и анализа мультилингвистического информационно-терминологического базиса (ИТБ), основным фактором, влияющим на трудоемкость изучения ИТБ является объем этого базиса. Для существенного снижения трудоемкости

изучения ИТБ, целесообразно уменьшить его объем, но при этом важно не допустить снижения качества. Уменьшения объема ИТБ можно добиться за счет уменьшения частотного словаря, на основе которого строится ИТБ. Но при искусственном уменьшении частотного словаря (например, при его урезании до

определенного размера или выборки слов, принадлежащих только к одной части речи) может произойти снижение качества получаемого ИТБ, так как часть относительно важных слов для изучения может быть потеряна, а менее важные будут включены в базис.

Построение частотных словарей на основе оригинальных текстов. Очевидным решением вышеописанных проблемы является построение частотного словаря только на основе тех текстов, с которыми, предполагается работать обучаемому. Будем называть такие тексты исходными. Например, такой подход может быть применен для быстрой наработки словарного запаса сотрудников крупных межнациональных корпораций, где используется большое количество документации на разных языках. Так, для обучающихся, работающих с техническими инструкциями, для достижения основной цели обучения будет достаточно построить частотный словарь на основе этих технических инструкций. Таким образом, в ИТБ попадут только те понятия, которые будут непосредственно встречаться обучающимся в ходе их дальнейшей работы, что будет способствовать более качественному и быстрому обучению.

Кроме того, частотные словари для текстов одной предметной области целесообразно строить автоматически. Это позволит достаточно быстро и легко сгенерировать частотный словарь для какой-либо предметной области без необходимости долгого ручного построения такого словаря.

В данной статье рассматривается способ автоматического построения частотного словаря на основе исходных текстов с применением лемматизации.

Построение частотных словарей с применением лемматизации. Лемматизация – это процесс приведения словоформы к лемме – ее нормальной (словарной) форме [3].

Благодаря лемматизации в частотный словарь будут заноситься не все словоформы одного и того же термина, встречающиеся в исходных текстах, а только одна (нормальная) форма слова, что приведет к существенному снижению объема частотного словаря.

Элемент частотного словаря представляет собой структуру данных, состоящую из следующих полей:

- 1) слово на исходном языке;
- 2) абсолютная частота встречаемости слова;
- 3) относительная частота встречаемости слова.

Алгоритм построения частотного словаря с применением лемматизации:

1. Разбить исходный текст на слова и занести их в массив слов `word[]`.
2. Проверить, достигнут ли конец массива слов `word[]`:
 - а) если дошли до конца массива, то перейти к шагу 7;
 - б) иначе выполнить следующие действия.
3. Взять очередное слово из массива слов (`word[i]`).
4. Провести лемматизацию текущего слова `word[i]`.
5. Поместить полученную лемму в текущий терм (`term`).

6. Проверить, есть ли полученный терм (`term`) в частотном словаре:

а) если терм (`term`) уже есть в частотном словаре, то увеличить частоту встречаемости данного термина на 1;

б) иначе (полученного термина (`term`) еще нет в частотном словаре) занести `term` в частотный словарь с частотой встречаемости, равной 1.

7. Перейти к следующему слову из массива слов ($i = i + 1$).

8. Рассчитать относительную частоту встречаемости для каждого термина из частотного словаря.

9. Отсортировать частотный словарь (либо в алфавитном порядке, либо по частоте встречаемости термов).

10. Сохранить частотный словарь.

11. Завершить работу алгоритма.

Однако при таком подходе в частотный словарь попадут все леммы из исходного текста, в том числе и общеупотребительная лексика, которая будет иметь высокую частоту встречаемости и может не соответствовать задачам обучения. Например, если стоит задача изучения терминологии предметной области, а не лексики в целом, то информационно-терминологический базис, полученный на основе такого частотного словаря, будет иметь больший объем и сравнительно низкое качество.

Кроме того, при лемматизации возможна потеря части терминов. Например, два термина `development` (разработка) и `developer` (разработчик) после лемматизации дадут один термин `develop` (разрабатывать), что опять же приводит к снижению качества информационно-терминологического базиса.

Поэтому для решения этих проблем можно применить метод сверки генерируемого частотного словаря с электронным специализированным словарем для конкретной предметной области. Таким образом, можно исключить из частотного словаря общеупотребительные выражения и лексику, оставив только термины и выражения, характерные для изучаемой предметной области, а также избежать потери терминов.

При таком подходе модифицированный алгоритм построения частотного словаря примет вид:

1. Разбить исходный текст на слова и занести их в массив слов `word[]`.
2. Проверить, достигнут ли конец массива слов `word[]`:
 - а) если дошли до конца массива, то перейти к шагу 7;
 - б) иначе выполнить следующие действия.
3. Взять очередное слово из массива слов (`word[i]`).
4. Проверить, есть ли текущее слово в специализированном словаре:
 - а) Если `word[i]` есть в специализированном словаре, то поместить текущее слово в текущий терм (`term = word[i]`);
 - б) иначе (текущего слова нет в специализированном словаре) провести лемматизацию текущего слова `word[i]`;

в) проверить, есть ли полученная лемма w_lem в специализированном словаре;

г) если w_lem есть в специализированном словаре, то поместить полученную лемму слова в текущий терм (term);

д) иначе перейти к шагу 6.

5. Проверить, есть ли полученный терм (term) в частотном словаре:

а) если терм (term) уже есть в частотном словаре, то увеличить частоту встречаемости данного термина на 1;

б) иначе (полученного термина (term) еще нет в частотном словаре) занести терм в частотный словарь с частотой встречаемости, равной 1.

6. Перейти к следующему слову из массива слов ($i = i + 1$).

7. Рассчитать относительную частоту встречаемости для каждого термина из частотного словаря.

8. Отсортировать частотный словарь (либо в алфавитном порядке, либо по частоте встречаемости термов).

9. Сохранить частотный словарь.

10. Завершить работу алгоритма.

Таким образом, в генерируемый частотный словарь попадут только те слова, выражения и формы слов, которые представляют собой термины либо специализированную лексику конкретной предметной области. Это позволит сократить объем частотного словаря, а соответственно, и информационно-терминологического базиса, а также повысить их качество.

В данной работе на основе анализа способов построения частотных словарей авторами предложен модифицированный алгоритм автоматического формирования частотных словарей на основе исходных текстов с применением лемматизации. При использовании данного алгоритма можно обеспечить построение информационно-терминологического базиса

меньшего объема и с сопоставимым уровнем качества. Таким образом, удастся достичь снижения трудоемкости изучения ИТБ и упрощения процесса его формирования.

Библиографические ссылки

1. Огнерубов С. С. Формирование информационно-терминологического базиса в мультилингвистических системах обучения : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2008.

2. Ковалев И. В., Карасева М. В., Лесков В. О. Алгоритмизация процедур включения связанных лексем в структуру информационно-терминологического базиса // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 28–32.

3. Атанов Г. А., Пустынникова И. Н. Структурирование понятий предметной области с помощью методов представления знаний // Искусственный интеллект. 1997. № 2. С. 29–40.

References

1. Ognerubov S. S. *Formirovaniye informatsionno-terminologicheskogo bazisa v mul'tilingvisticheskikh sistemakh obucheniya*. Diss. kand. tekhn. Nauk [Formation of the informational and terminological basis in multilingual training systems. Thesis for candidate's degree]. Krasnoyarsk, 2008.

2. Kovalev I. V., karaseva M. V., Leskov V. O. *Programmnie produkti i sistemi*. 2009, no. 4, p. 28–32.

3. Atanov G. A., Pustinnikova I. N. *Iskusstvennii intellect*. 1997 no 2, p. 29–40.

© Ковалев И. В., Середин А. И., Карасева М. В., Зеленков П. В., Храпунова В. В., 2013

УДК 62.501

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКОЙ

М. Е. Корнет

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: maria4business@mail.ru

Рассматривается задача непараметрической идентификации дискретно-непрерывного процесса кислородно-конвертерной плавки стали. Отмечаются особенности идентификации в условиях параметрической и непараметрической неопределенности. Подчеркивается целесообразность использования непараметрических методов в условиях малой априорной информации. Построен ряд непараметрических моделей процесса кислородно-конвертерной плавки стали по важнейшим выходным переменным, определяющим химический состав металла на повалке: углероду (C), сере (S), фосфору (P) и марганцу (Mn). Приводятся некоторые результаты моделирования процесса кислородно-конвертерной плавки стали, которые показывают, что процесс ведется в рамках технологического регламента, однако этого не достаточно для качественного управления процессом плавки.

Ключевые слова: идентификация дискретно-непрерывных процессов, непараметрическая регрессия, непараметрическая идентификация кислородно-конвертерной плавки.

ABOUT THE NONPARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE OXYGEN-CONVERTER STEELMAKING CONTROL SYSTEM

M. E. Kornet

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: maria4business@mail.ru

The paper considers the problem of the nonparametric identification of the discrete and continuous process of the basic oxygen steel melting. The identification peculiarities in conditions of parametric and nonparametric uncertainty are pointed out. The appropriateness of the nonparametric methods use in conditions of small information given a priori is emphasized. Some non-parametrical models of the process of basic oxygen steel melting are built according to the key output variables determining the metal chemical composition at turndown: carbon (C), sulfur (S), phosphorus (P) and manganese (Mn). Some results of the modeling process of the basic oxygen steel melting showed that the process is conducted in the framework of the technological order, however, it is not enough for the qualified control by the melting process.

Keywords: discrete-continuous process identification, nonparametric regression, nonparametric identification for oxygen-converter steelmaking.

Проблема моделирования, идентификации надолго останется одной из центральных проблем теории управления. Постановка задачи идентификации во многом зависит от класса исследуемого процесса (статические, динамические, линейные, нелинейные и др.) и от объема априорной информации. Эта проблема продолжает оставаться актуальной для различных реальных процессов дискретно-непрерывного типа. В докладе приводятся некоторые результаты моделирования процесса выплавки стали.

Постановка задачи. Приведем общепринятую схему исследуемого процесса, принятую в теории идентификации (рис. 1).

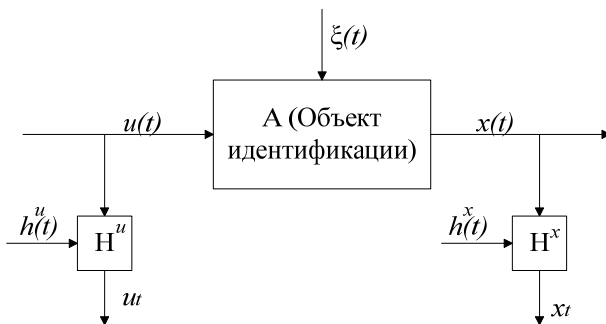


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса и контроля переменных

На рис. 1 приняты обозначения: A – неизвестный с точностью до параметров оператор объекта; $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$ – вектор выходных переменных процесса; $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$ – вектор входных воздействий; $\xi(t)$ – векторная случайная помеха; (t) – непрерывное время; H^u , H^x – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля; $\bar{h}^u(t)$, $\bar{h}^x(t)$ – случайные помехи измерений соответствующих пе-

ременных процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией. Контроль $u(t)$, $x(t)$ осуществляется через интервал времени Δt . Таким образом, мы имеем выборку входных-выходных переменных $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$, где s – объем выборки.

Итак, стоит задача идентификации, т. е. необходимо восстановить зависимости между входными-выходными характеристиками процесса. В зависимости от уровня априорной информации об объекте различают идентификацию в узком и широком смыслах.

Идентификация в узком и широком смыслах. При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в «узком» смысле [1]. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе на основании имеющейся априорной информации определяется параметрический класс операторов A^α , например:

$$\tilde{x}_\alpha(t) = A^\alpha(u(t), \alpha), \quad (1)$$

где A^α – параметрическая структура модели; α – вектор параметров. На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$, где s – объем выборки. Оценка параметров может осуществляться с помощью многочисленных рекуррентных процедур, в частности, методом стохастических аппроксимаций либо методом наименьших квадратов. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (1). В настоящее время теория параметрической идентификации является наиболее развитой [1].

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора [2]. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности про-

цесса или его нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании такого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$:

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s), \quad (2)$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, $\vec{u}_s = (u_1, u_2, \dots, u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики [2; 3]. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым можно утверждать, что идентификация в широком смысле является более адекватной для некоторых реальных задач.

Непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям. Пусть даны наблюдения $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$ случайных величин x, u , распределенных с неизвестными плотностями вероятности $p(x, u)$, $p(u) > 0 \forall u \in \Omega(u)$. Для восстановления $\tilde{x} = M\{x | u\}$ используются непараметрические оценки [2; 3]:

$$x_s(u) = \sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) / \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), \quad (3)$$

где $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$, $i = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$ – ядерная колоколообразная функция и коэффициент размытости ядра c_s удовлетворяют некоторым условиям сходимости [2; 3].

В данной работе в качестве колоколообразной функции $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$ было использовано треугольное ядро вида

$$\begin{aligned} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) &= \\ &= \begin{cases} 1 - |c_s^{-1}(u^j - u_i^j)|, & \text{если } |c_s^{-1}(u^j - u_i^j)| \leq 1, \\ 0, & \text{если } |c_s^{-1}(u^j - u_i^j)| > 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Параметр размытости c_s определяется путем решения задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на методе скользящего экзамена, когда в модели (3) исключается i -я переменная, предъявляемая для экзамена:

$$R(c_s) = \sum_{k=1}^s (x_k - x_s(u_k, c_s))^2 = \min_{c_s}, \quad k \neq i. \quad (5)$$

Если же входная переменная u представляет собой вектор, то для каждой компоненты u необходимо найти свой параметр размытости c_s . Однако если предварительно привести выборку значений вектора u к одному интервалу, используя операции центрирования и нормирования, то параметр размытости можно принять скалярной величиной.

Примеры непараметрических зависимостей для конвертерной плавки стали. В работе рассматрива-

ется процесс конвертерной выплавки стали [4], который может быть представлен в виде схемы (рис. 2), на которой показаны входные-выходные переменные процесса.

Введем обозначения для входных переменных процесса. Векторная переменная «Расход материала» (т) включает в себя: u_1 – расход чугуна, u_2 – расход лома, u_3 – расход извести, u_4 – расход электродного боя, u_5 – расход флюса ФОМИ, u_6 – расход ФМ-1, u_7 – расход агломерата офлюсованного, u_8 – расход угля ССО. К входным переменным относятся u_9 – кислород на продувку, м³ и u_{10} – кислород на прогрев, м³. Химический состав заливаемого чугуна (%) определяется содержанием следующих элементов: u_{11} – кремний Si, u_{12} – марганец Mn, u_{13} – сера S, u_{14} – фосфор P. Входную переменную «Температура чугуна» (С°) обозначим u_{15} .

К выходным переменным процесса относится векторная переменная «Химический состав металла на повалке» (%), которая включает в себя элементы: x_1 – углерод C, x_2 – марганец Mn, x_3 – сера S, x_4 – фосфор P, x_5 – температура металла на первой повалке, С°, x_6 – температура металла на второй повалке, С°; выходная векторная переменная «Химический состав конечного шлака на повалке» (%), которая включает в себя: x_7 – CaO, x_8 – SiO₂, x_9 – FeO, x_{10} – MgO, x_{11} – Al₂O₃, x_{12} – S, x_{13} – MnO, x_{14} – P₂O₅, x_{15} – TiO₂, x_{16} – V₂O₅.

Важнейшей выходной переменной является векторная переменная «Химический состав металла на повалке» (%), которая включает в себя четыре переменные: $x_1(u)$ (углерод C), $x_2(u)$ (марганец Mn), $x_3(u)$ (S сера), $x_4(u)$ (фосфор P). Для вычислительного эксперимента было построено 4 непараметрических модели вида

$$x_s^l(u) = \sum_{i=1}^{35} x_i \prod_{j=1}^{15} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) / \sum_{i=1}^{35} \prod_{j=1}^{15} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), \quad (6)$$

где $l = \overline{1, 4}$, объем выборки в данном случае был равен $s = 35$.

Для оценки полученных моделей была использована квадратичная ошибка:

$$R_s = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_i - x_i^s)^2, \quad (7)$$

где x_i – измеренное значение выходной переменной; x_i^s – полученная оценка; R_s – квадратичная ошибка.

Непараметрические модели были построены в режиме «скользящего среднего» для выходных переменных x_1, x_2, x_3, x_4 . Полученные результаты представлены в таблице где показаны: квадратичная ошибка моделирования R_s (7), оценка дисперсии D_s выхода объекта x_i , а также ошибка прогнозирования $W = R_s / D_s$.

Как видно из таблицы, ошибка прогнозирования достаточно велика. Это говорит о том, что полученный прогноз является достаточно грубым.

На рис. 3 показан характер зависимости концентрации углерода C (%) в металле на повалке от содержания лома (т.) в расходных материалах. Содержание лома в данном случае является величиной нормированной. Графики представляют собой срезы при

14 фиксированных входных переменных $u_1, u_3, u_4, \dots, u_{15}$, а переменная u_2 (содержание лома) изменяется в границах $[-2; 2,5]$. Кривая 1 соответствует случаю, когда все фиксированные переменные принимали свое среднее значение. Кривая 2 соответствует сдвигу фиксированной переменной u_1 (чугун) на 0,3 от своего среднего значения, кривая 3 – сдвиг на величину $-0,3$ от среднего значения.

Из приведенного рисунка следует, что характер зависимости нелинейный и достаточно точно описывает канал «расход материала (чугун, лом, известь, электродный бой, флюс, ФМ-1, агломерат офлюсованный, уголь ССО), кислород на продувку, кислород на прогрев, химический состав заливаемого чугуна (кремний Si, марганец Mn, сера S, фосфор P), температура чугуна – углерод (C) в металле на повалке». А это означает, что использование подобных моделей может оказаться полезным для управления процессом конвертерной выплавки стали.

На рис. 4 показан характер зависимости концентрации фосфора P (%) от содержания извести (т) в расходных материалах. Содержание извести здесь

является величиной нормированной. Как и в предыдущем случае, графики представляют собой срезы при 14 фиксированных входных переменных и одной изменяющейся переменной u_2 (содержание извести), которая изменяется в границах $[-2; 2,5]$. Кривая 1 соответствует случаю, когда все фиксированные переменные принимали свое среднее значение. Кривая 2 соответствует сдвигу фиксированной переменной u_2 (лом) на 0,3 от своего среднего значения, кривая 3 – сдвиг на величину $-0,3$ от среднего значения.

Рис. 4 показывает нелинейный характер рассматриваемой зависимости, причем здесь нелинейность уже более сильная, чем в предыдущем случае (см. рис. 3). Зависимость описывает канал «расход материала (чугун, лом, известь, электродный бой, флюс, ФМ-1, агломерат офлюсованный, уголь ССО), кислород на продувку, кислород на прогрев, химический состав заливаемого чугуна (кремний Si, марганец Mn, сера S, фосфор P), температура чугуна – фосфор (P) в металле на повалке». Использование подобных моделей также может оказаться полезным для управления процессом конвертерной выплавки стали.

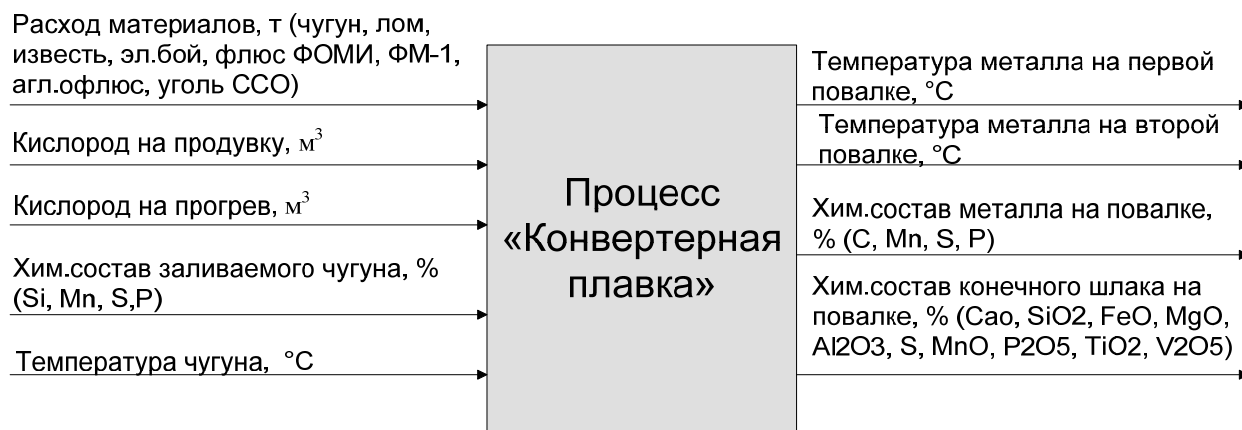


Рис. 2. Входные и выходные переменные процесса конвертерной плавки

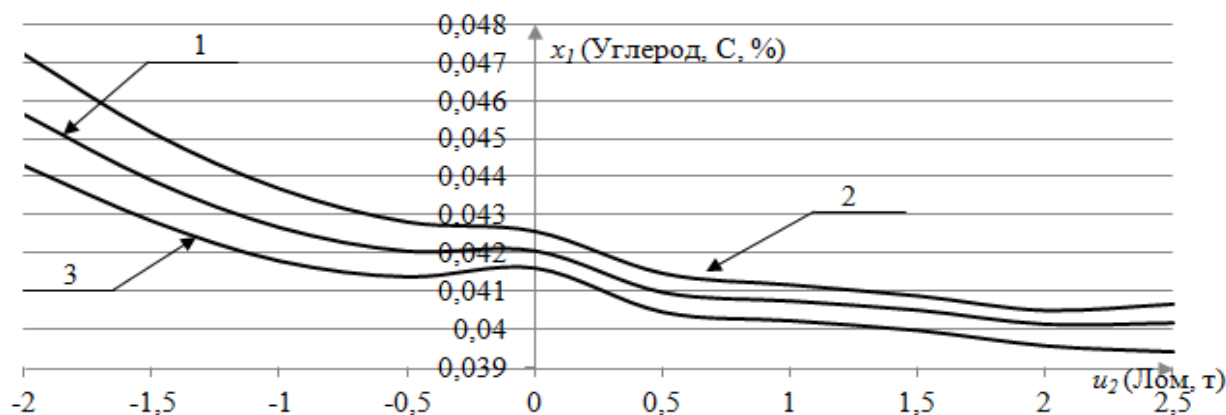


Рис. 3. Характер зависимости концентрации углерода C на повалке от содержания лома (т) в расходных материалах лома

Результаты вычислительного эксперимента

Элемент	Показатель		
	Ошибка R_i	Оценка дисперсии D_s выходной переменной x_i	Отношение W
Углерод, С (x_1)	0,000 197 78	0,000 234	0,845
Марганец, Mn (x_2)	0,000 430 135 8	0,000 540 4	0,85
Сера, S (x_3)	0,000 007 55	0,000 011 83	0,64
Фосфор, P (x_4)	0,000 040 77	0,000 041 137	0,99

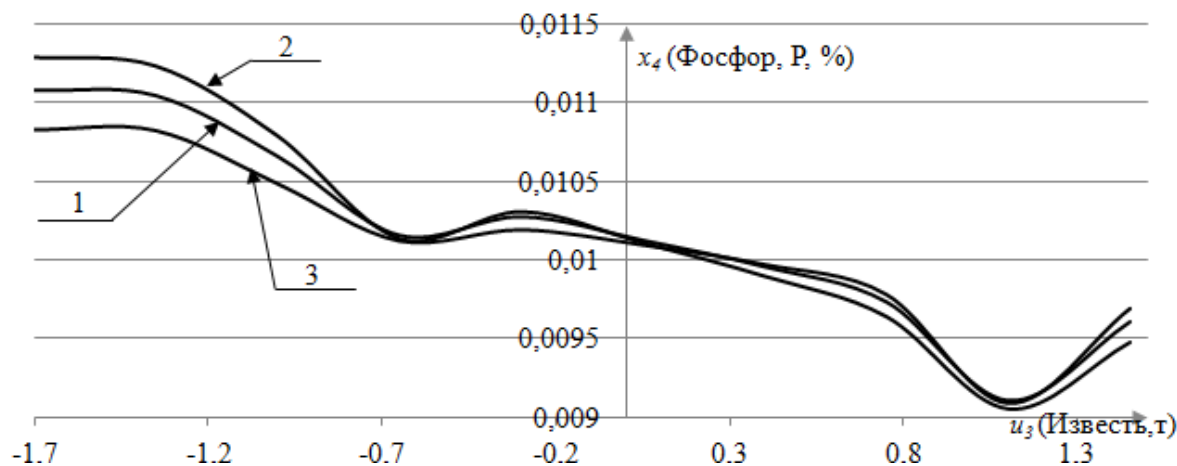


Рис. 4. Характер зависимости концентрации фосфора на повалке от содержания в расходных материалах извести

В статье рассмотрена задача идентификации дискретно-непрерывных процессов в условиях параметрической и непараметрической неопределенности. Анализируется вопрос идентификации в узком и широком смыслах. Приводятся непараметрические модели для многомерных дискретно-непрерывных процессов.

Построены непараметрические модели для следующих важнейших выходных переменных процесса, определяющих содержание основных химических элементов в металле на повалке: углерод (С), марганец (Mn), сера (S), фосфор (P). Приводятся результаты предварительных расчетов. Вычислительные эксперименты показали, что управление процессом кислородно-конвертерной плавки ведется неудовлетворительно, но, тем не менее, соответствует технологическому регламенту. Иными словами, в рамках технологического регламента управляемый процесс представляет собой «облако», т. е. переменные процесса могут принимать произвольные значения из всей области определения переменных, регламентируемой технологической картой. На нынешних предприятиях технологический регламент чаще всего достаточно широк, и если процесс ведется в рамках технологического регламента, но не рациональным образом, то ожидать конечного продукта высокого качества не следует. Полученные непараметрические модели требуют дальнейшего исследования.

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.
2. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд. Тбил. ун-та, 1983. 194 с.
3. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 174 с.
4. Воскобойников В. Г. Общая металлургия. М. : Металлургия, 1998. 768 с.

References

1. Tsypkin J. Z. *Adaptacia i obuchenie v avtomaticheskikh sistemah* (The adaptation and learning in automatic systems). Moscow, Nauka, 1968, 400 p.
2. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti veroyatnosti i krivoj regressii* (Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve). Tbilisi, izd. Tbil. un-ta, 1983, 194 p.
3. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptacii* (Nonparametric adaptation systems). Novosibirsk, Nauka, 1983, 174 p.
4. Voskoboynikov V. G. *Obschaya metallurgia* (Overall Metallurgy). Moscow, Metallurgia, 1997. 768 p.

© Корнет М. Е., 2013

УДК 532.516

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ДВУМЕРНОГО СЛОЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ*

Д. А. Краснова

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44. E-mail: krasnova-d@mail.ru

Исследованы групповые свойства уравнений движения двумерного слоя идеальной жидкости относительно функции, описывающей толщину слоя жидкости под свободной границей. Уравнения записаны в модифицированных переменных, что позволило зафиксировать границы области по новой переменной ξ . Поставлена задача группового анализа, найден продолженный оператор на первые производные, используя критерий инвариантности, построены определяющие уравнения и найдены преобразования эквивалентности для системы уравнений (1)–(4). Преобразования эквивалентности – это такие преобразования, которые сохраняют структуру исходной системы уравнений. Доказано, что преобразования эквивалентности для системы (5)–(8) имеют структуру бесконечномерной группы преобразований. Данная задача имеет прикладное значение для нахождения точных решений систем дифференциальных уравнений вида (1)–(4).

Ключевые слова: групповой анализ, идеальная жидкость.

TRANSFORMATIONS OF THE EQUIVALENCE OF THE MOVEMENT EQUATIONS OF A TWO-DIMENSIONAL LAYER OF IDEAL LIQUID

D. A. Krasnova

Institute computational modeling SB RAS
50/44, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation. E-mail: krasnova-d@mail.ru

Group properties of the equations of the movement of a two-dimensional layer of ideal liquid concerning the function describing thickness of a layer of liquid under free border are investigated. The equations are written down in the modified variables that allowed to record area borders on a variable. The task of the group analysis is set, the continued operator on the first derivatives is found, using the criterion of invariancy, the defining equations are constructed and equivalence transformations for system of the equations (1)–(4) are found. Transformations of equivalence are such transformations which keep structure of initial system of the equations. It is proved that the equivalence transformations for the system (5)–(8) have the structure of the infinite-dimensional group of transformations. This task has applied the value for finding of exact decisions of systems of the differential equations of a look (1)–(4).

Keywords: Group analysis, ideal liquid.

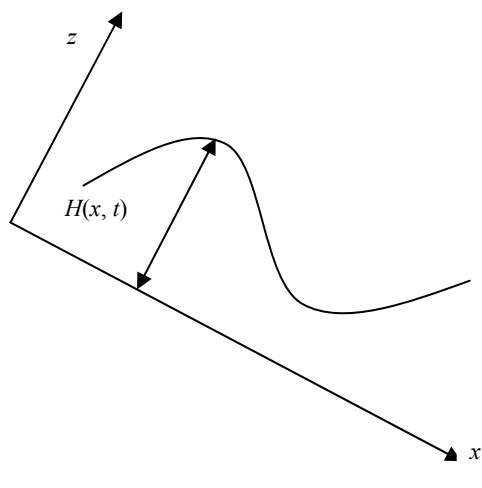
Описание системы уравнений. Многие исследователи нелинейных уравнений давно используют групповой анализ дифференциальных уравнений. Так как принципы инвариантности закладываются при выводе уравнений, применение группового анализа особенно эффективно и плодотворно в области фундаментальной механики и физики [1–4].

В последнее время особо актуальным стало исследование задач математического моделирования разнообразных физических процессов. Главной целью группового анализа является построение точных решений дифференциальных уравнений. На пути построения этих решений важной частью задачи является нахождение преобразований эквивалентности для заданной системы уравнений. В данной работе получены преобразования эквивалентности для системы уравнений, описывающей двумерное движение иде-

альной жидкости, записанных в модифицированных переменных.

Рассмотрим систему уравнений движения двумерного слоя идеальной жидкости по наклонной плоскости. Уравнения запишем в декартовой системе координат так, чтобы ось z была ортогональна к подложке, а ось x направлена в сторону действия скатывающей силы. Жидкость занимает область $\Omega = \{(x, z) : -\infty < x < +\infty, 0 < z < H(x, t)\}$, где t – время; H – толщина слоя жидкости. В уравнения движения жидкости входят компоненты вектора скорости (u, w) , p – давление (скатывающие силы заменой переменных можно включить в давление). Слой жидкости имеет твердую подложку при $z = 0$ и свободную границу при $z = H(x, t)$ (см. рисунок).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 11–01–00238.



Движение двумерного слоя жидкости толщины H по наклонной плоскости

Рассмотрим систему уравнений движения двумерного слоя идеальной жидкости по наклонной плоскости. Уравнения запишем в декартовой системе координат так, чтобы ось z была ортогональна к подложке, а ось x направлена в сторону действия скатывающей силы. Жидкость занимает область $\Omega = \{(x, z) : -\infty < x < +\infty, 0 < z < H(x, t)\}$, где t – время; H – толщина слоя жидкости. В уравнения движения жидкости входят компоненты вектора скорости (u, w) , p – давление (скатывающие силы заменой переменных можно включить в давление). Слой жидкости имеет твердую подложку при $z = 0$ и свободную границу при $z = H(x, t)$ (см. рисунок).

В дальнейшем вводятся новые координаты

$$\bar{t} = t, \quad \bar{x} = x, \quad \xi = \frac{z}{H(x, t)},$$

модифицированные компоненты вектора скорости и давление [5]:

$$\bar{u} = uH, \quad \bar{w} = w - u\xi H_x, \quad \bar{p} = p.$$

Это позволяет фиксировать границы области по ξ , $\Omega = \{(x, \xi) : -\infty < x < +\infty, 0 < \xi < 1\}$. Система уравнений в новых переменных записывается в виде (черту над переменными опускаем)

$$\rho[Hu_t - H_t(u + \xi u_\xi) + uu_x + wu_\xi - \frac{H_x(u)^2}{H}] = H^2[-p_x + \frac{\xi H_x}{H} p_\xi], \quad (1)$$

$$\rho[H(w+S)_t - \xi H_t(w+S)_\xi + u(w+S)_x + w(w+S)_\xi] = -p_\xi, \quad (2)$$

$$u_x + w_\xi = 0, \quad (3)$$

$$H_\xi = 0, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости (ее можно положить равной единице); $S = (\xi u^1 H_x)/H$; нижние индексы обозначают дифференцирование по x, ξ, t функций u, w, p . Функция $H(x, t)$ и ее производные существенно входят в уравнения (1)–(4), которые образуют замкнутую систему относительно u, w, p .

Решение определяющих уравнений. Поставим задачу группового анализа для уравнений (1)–(4). Необходимо найти преобразования эквивалентности для этой системы уравнений. Преобразования эквивалентности – это преобразования, которые сохраняют структуру исходной системы уравнений [1].

Введем индексные обозначения:

$$x^1 = x, \quad x^2 = \xi, \quad x^3 = t,$$

$$u^1 = u, \quad u^2 = w, \quad u^3 = p, \quad u^4 = H.$$

Будем считать, что если $f(x^1, x^2, x^3)$ – некоторая функция, то

$$f_i = \frac{\partial f}{\partial x^i}, \quad f_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^i \partial x^j}, \quad \dots, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Система уравнений (1)–(4) перепишется в индексных обозначениях так:

$$Hu_3^1 - H_3(u^1 + x^2 u_2^1) + u^1 u_1^1 + u^2 u_2^1 - \frac{1}{H} H_1(u^1)^2 + H^2 u_1^3 - x^2 H H_1 u_1^3 = 0, \quad (5)$$

$$Hu_3^2 + x^2(u_3^1 H_1 + u^1 H_{13} - \frac{1}{H} u^1 H_1 H_3) - x^2 H_3(u_2^2 + \frac{1}{H} H_1(u^1 + x^2 u_2^1)) + u^1 u_1^2 + u^1 x^2(\frac{1}{H} H_1 u_1^1 + \frac{1}{H} H_{11} u^1 - \frac{1}{(H_1)^2}) + u^2(u_2^2 + \frac{1}{H} H_1(u^1 + x^2 u_2^1)) + u_2^3 = 0, \quad (6)$$

$$u_1^1 + u_2^2 = 0, \quad (7)$$

$$u_2^4 = 0. \quad (8)$$

Инфинитезимальный оператор, допускаемый системой (5)–(8), ищем в виде [1]

$$X = \xi^i \frac{\partial}{\partial x^i} + \eta^\alpha \frac{\partial}{\partial u^\alpha}, \quad (9)$$

где $i, \alpha = 1, 2, 3, 4$, а координаты оператора ξ^i, η^α зависят от всех зависимых и независимых переменных (по всем повторяющимся индексам производится суммирование).

Поскольку в систему уравнений входят первые производные, то для формирования определяющих уравнений нужно продолжить оператор X на первые производные:

$$X_1 = X + \zeta_l^\beta \frac{\partial}{\partial u_l^\beta},$$

$$\zeta_l^\beta = \frac{\partial \eta^\beta}{\partial x^i} + u_l^n \frac{\partial \eta^\beta}{\partial x^n} - u_l^\beta \left(\frac{\partial \xi^j}{\partial x^i} + u_l^n \frac{\partial \xi^j}{\partial x^n} \right),$$

где $\beta, l = 1, 2, 3$ (суммирование по повторяющимся индексам), координаты ζ_l^β зависят от всех x^i, u^α и производных u_l^α . Далее, действуя оператором X_1 на уравнения (8), (7), (6), (5), из критерия инвариантности [1] получаем определяющие уравнения, которые расщепляем по независимым переменным. При этом переходим на многообразие, задаваемое исходными

уравнениями, т. е. u_3^1, u_3^2, u_2^2 выражаем через оставшиеся элементы и подставляем в определяющие уравнения. Используем также четвертое уравнение $u_2^4 = 0$.

После достаточно трудоемких выкладок при расщеплении определяющих уравнений относительно независимых переменных получаем следующее представление координат оператора (9):

$$\begin{aligned}\xi^1 &= B_1 x^1 + C_1, \\ \xi^2 &= (B_1 - A_4) x^2, \\ \xi^3 &= B_3 x^3 + C_3, \\ \eta^1 &= (B_1 + A_4 - B_3) u^1, \\ \eta^2 &= (B_1 - B_3) u^2, \\ \eta^3 &= (B_1 - B_3) u^3 + D(x^3), \\ \eta^4 &= A_4 u^4,\end{aligned}$$

где $A_1, A_4, B_1, B_3, C_1, C_3$ – постоянные; $D(x^3)$ – произвольная функция.

Выпишем операторы преобразования эквивалентности:

$$\begin{aligned}X_1 &= \frac{\partial}{\partial x^1}, \\ X_2 &= \frac{\partial}{\partial x^3}, \\ X_3 &= x^1 \frac{\partial}{\partial x^1} + x^2 \frac{\partial}{\partial x^2} + u^1 \frac{\partial}{\partial u^1} + u^2 \frac{\partial}{\partial u^2} + 2u^3 \frac{\partial}{\partial u^3}, \\ X_4 &= x^3 \frac{\partial}{\partial x^3} - u^1 \frac{\partial}{\partial u^1} - u^2 \frac{\partial}{\partial u^2} - 2u^3 \frac{\partial}{\partial u^3}, \\ X_5 &= -x^2 \frac{\partial}{\partial x^2} + u^1 \frac{\partial}{\partial u^1} + u^4 \frac{\partial}{\partial u^4}, \\ X_6(D(x^3)) &= D(x^3) \frac{\partial}{\partial u^3}.\end{aligned}$$

На основании теоремы Ли для найденных операторов ставится во взаимно однозначное соответствие группа преобразований переменных $x^1, x^2, x^3, u^1, u^2, u^3, h$. Тем самым доказали, что преобразования эквивалентности для системы (5)–(8) имеют структуру бесконечномерной группы преобразований:

$$\begin{aligned}G^{\text{ЭКВ}} : \{ \overline{x^1} &= b_3 b_4 x^1 + b_1; \quad \overline{x^2} = b_3 b_4 b_5^{-1} x^2; \\ \overline{x^3} &= b_4 x^3 + b_2; \quad \overline{u^1} = b_3 b_5 u^1; \quad \overline{u^2} = b_3 u^2; \\ \overline{u^3} &= b_3^2 u^3 + \Psi(x^3); \quad \overline{h} = b_5 H \},\end{aligned}\quad (10)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 – групповые параметры (10), $\Psi(x^3)$ – произвольная функция. Заметим, что для H в $G^{\text{ЭКВ}}$ допускается только растяжение с одновременным растяжением для x^2 и u^1 .

Автор благодарит своего научного руководителя В. К. Андреева за постановку задачи.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. М. : Наука, 1978. 400 с.
2. Ибрагимов Н. Х. Группы преобразований в математической физике. М. : Наука, 1983. 280 с.
3. Применение теоретико-групповых методов в гидродинамике / В. К. Андреев, О. В. Капцов, В. В. Пухначев, А. А. Родионов. Новосибирск : Наука, 1994. 319 с.
4. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. 192 с.
5. Кузнецов В. В. Термокапиллярные течения в пограничных и тонких слоях : дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск : ИГ СО РАН, 2001. 187 с.

References

1. Ovsyannikov L. V. *Gruppovoy analiz differentsialnykh uravneniy* (Group analysis of differential equations). Moscow, Nauka, 1978, 400 p.
2. Ibragimov N. H. *Gruppy preobrazovaniy v matematicheskoy fizike* (Groups of transformations in mathematical physics). Moscow, Nauka, 1983, 280 p.
3. Andreev V. K., Kaptsov O. V., Pukhnachev V. V., Rodionov A. A. *Primeneniye teoretiko-gruppovykh metodov v gidrodinamike* (Application of group-theoretic methods in hydrodynamics). Novosibirsk, Nauka, 1994, 319 p.
4. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yakhno A. N. *Prilozheniye simmetriy i zakonov sokhraneniya k resheniyu differentsialnykh uravneniy* (Application of symmetriya and preservation laws to the solution of the differential equations). Novosibirsk, Publishing SB RAS, 2001, 192 p.
5. Kuznetsov V. V. *Termokapillyarnyye techeniya v pogranchnykh i tonkikh sloyakh* (Thermocapillary currents in boundary and thin layers). Diss. doct. phys.-mat. sciences. Novosibirsk, IG SB RAS, 2001, 187 p.

© Краснова Д. А., 2013

УДК 524.33

НОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ОБСЕРВАТОРИИ СибГАУ В МАРТЕ-АПРЕЛЕ 2013 ГОДА

Е. Г. Лапухин, С. А. Веселков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: slovoktk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

Выявлена переменность у звезд USN0-A2.0 1425-07730275, USN0-A2.0 1425-07730877, USN0-A2.0 1425-07732585, USN0-A2.0 1350-08023794, USN0-A2.0 1425-07735907, USN0-A2.0 1425-07736119, USN0-A2.0 1425-07744258, USN0-A2.0 1425-07747819, USN0-A2.0 1350-08038347, USN0-A2.0 1425-07749499, USN0-A2.0 1425-07756005, USN0-A2.0 1425-07758087, USN0-A2.0 1425-07760594, USN0-A2.0 1425-07765707.

Ключевые слова: переменные звезды, тип переменности, затменно-переменная система.

THE NEW VARIABLE STARS DISCOVERED IN THE OBSERVATORY OF SibSAU IN MARCH-APRIL, 2013

E. G. Lapukhin, S. A. Veselkov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: slovoktk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

We found variability of brightness in the stars USN0-A2.0 1425-07730275, USN0-A2.0 1425-07730877, USN0-A2.0 1425-07732585, USN0-A2.0 1350-08023794, USN0-A2.0 1425-07735907, USN0-A2.0 1425-07736119, USN0-A2.0 1425-07744258, USN0-A2.0 1425-07747819, USN0-A2.0 1350-08038347, USN0-A2.0 1425-07749499, USN0-A2.0 1425-07756005, USN0-A2.0 1425-07758087, USN0-A2.0 1425-07760594, USN0-A2.0 1425-07765707.

Keywords: variable stars, variability type, eclipsing binary systems.

Одним из направлений деятельности обсерватории СибГАУ является выявление переменных звезд и их исследование. Опубликованные ранее результаты представлены в ряде статей в журнале «Переменные звезды. Приложения» [1–6]. В марте-апреле 2013 г. были получены ПЗС-наблюдения, по которым выявлено 14 новых переменных звезд. Для этих звезд построены кривые блеска, приведенные к одному периоду, определены тип переменности, максимумы и минимумы изменения блеска, момент главного экстремума и период изменения блеска. Данный участок неба также попал в астероидный обзор, проводимый лабораторией LINEAR, по которому независимо был осуществлен поиск переменных звезд. Переменность некоторых звезд была подтверждена, а типы EA и BY оказались не выявлены. Периодичность получения ПЗС-изображений объясняет эту причину.

Поиск переменных звезд осуществляется с помощью метода, основанного на анализе распределения среднеквадратичного отклонения блеска звезды $\sigma(m_i)$ от блеска звезды m_i . Данный метод реализован К. Соколовским в пакете программ VaST [7] по поиску переменных звезд и описан Д. М. Колесниковой [8].

Суть метода заключена в следующем. На полученных снимках измеряется звездная величина m_i для каждой звезды и фиксируется время получения снимка t_i . Таким образом, для определения фотометрического ряда $\{m_i, t_i\}$ используются все ПЗС-изобра-

жения. Далее строится распределение среднеквадратичного отклонения блеска от блеска звезды. Звезды, лежащие вне распределения, являются потенциальными кандидатами в переменные звезды, которые индивидуально исследуются на переменность.

Выявленные вышеизложенным методом переменные звезды проверяются на известность по базам данных Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ) [9] и международного регистра переменных звезд The International Variable Star Index (VSX) [10]. Для исследования периодичности использовался метод Лафлер–Кинмана, реализованный в программе «Эффект» В. П. Горанского [11].

Наблюдательный материал получен в марте-апреле 2013 года на штатном телескопе системы Гамильтона с апертурой 400 мм и фокусным расстоянием 915 мм. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-матрица FLI ML9000. Масштаб изображения на полученных снимках составляет 2,7"/пиксель. Все ПЗС-изображения исследуемого участка получены в интегральном свете (без фильтра) с экспозициями 30 с. Все снимки прошли первичную обработку: учет темнового тока, токов смещения и учет неравномерной чувствительности пикселей матрицы. При фотометрии использовался блеск звезд сравнения в фильтре R из каталога USN0-A2.0. Наблюдательный материал получен с двухминутными интервалами в течение каждой наблюдательной ночи.

Такой подход позволяет выявить краткосрочные изменения блеска исследуемых звезд.

На поле $2^{\circ},3 \times 4^{\circ},6$ в созвездии Большая Медведица выявлено 14 новых переменных звезд, определены типы и основные характеристики переменности. Выявленные переменные звезды на момент их открытия не были зафиксированы в базах данных ОКПЗ и VSX.

В настоящее время во многих обсерваториях поиск переменных звезд происходит не только по текущим наблюдениям, но и активно используются архивные наблюдения. Астероидный обзор лаборатории по поиску околоземных астероидов имени Линкольна (LINEAR) позволил накопить обширный наблюдательный материал, по которому выявляются новые переменные звезды. В работе «Exploring the Variable Sky with LINEAR. III. Classification of Periodic Light Curves» L. Palaversa с соавторами [12] представлено примерно 7000 новых переменных звезд (для поиска использовался наблюдательный материал, полученный в течение 10 лет).

Половина переменных звезд, выявленных на участке в Большой Медведице, были независимо выявлены и сотрудниками проекта LINEAR.

Данные о 14 новых переменных звездах приведены в таблице, где указан номер звезды по каталогу USN0-A2.0, координаты на эпоху J2000, тип переменности, максимальное и минимальное значение блеска,

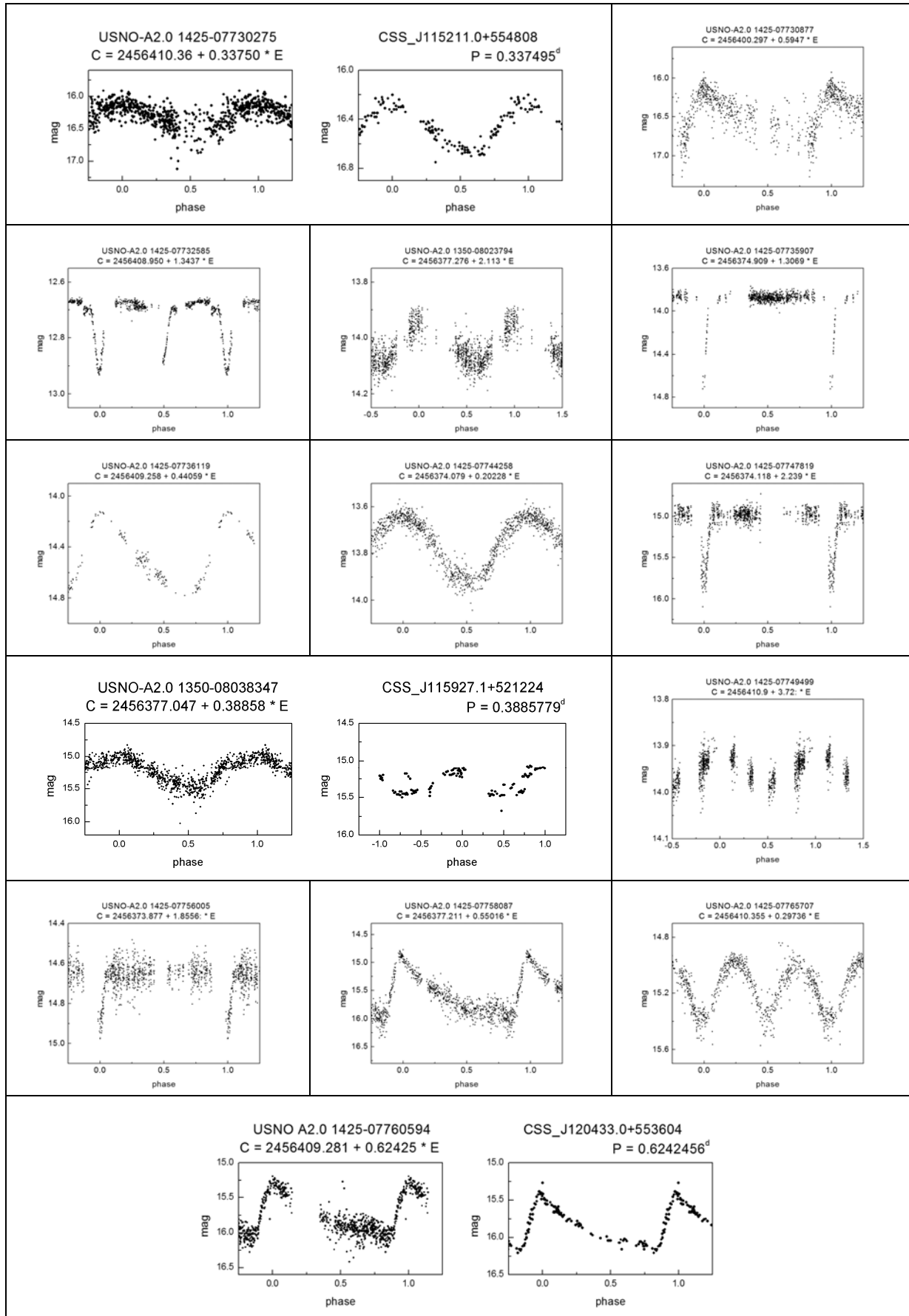
эпоха главного экстремума и период P изменения блеска звезды. Также указан период по данным LINEAR-обзора, вычисленный L. Palaversa, или «не выявлена», если звезда ими не обнаружена.

Кривые блеска, приведенные к одному периоду, показаны на рисунке. Ось ординат отражает блеск звезды, ось абсцисс показывает фазу изменения блеска в долях периода. Над графиками приведены номер по каталогу USN0-A2.0 и формула для вычисления момента главного экстремума, где C – вычисляемый момент; E – порядковый номер экстремума от эпохи нулевого экстремума (первое слагаемое в формуле). Переменность некоторых звезд подтверждена по данным обзора Catalina Sky Survey [13] (CSS), целью которого является выявление и каталогизация околоземных астероидов. Кривые блеска, построенные по фотометрическим данным CSS, обозначены CSS JHHMMSS.s+DDMMSS, где JHHMMSS.s+DDMMSS – координаты объекта.

Следует отметить, что если использовать наблюдательный материал, разнесенный на большом промежутке времени, то существуют типы переменных звезд, вероятность обнаружения которых достаточно мала. В случае с LINEAR-обзором для построения кривых блеска ими использовалось в среднем 250 точек, полученных в течение 10 лет. Естественно, что краткосрочные изменения блеска при таком подходе выявить довольно сложно.

Переменные звезды в Большой Медведице

№	USN0-A2.0	Координаты (J 2000)	Тип	Max	Min	Эпоха (JD 24...)	P, сут	
							СибГАУ	LINEAR
1	1425-07730275	$11^{\text{h}}52^{\text{m}}11^{\text{s}},03$ $+55^{\circ}48'08'',4$	RRC	$16^{\text{m}},14$	$16^{\text{m}},61$	2456410,36	0,3375	0,337494
2	1425-07730877	$11^{\text{h}}52^{\text{m}}24^{\text{s}},41$ $+57^{\circ}03'04'',2$	RRAB	$16^{\text{m}},19$	$16^{\text{m}},78$	2456400,297	0,5947	0,594436
3	1425-07732585	$11^{\text{h}}53^{\text{m}}04^{\text{s}},45$ $+56^{\circ}11'41'',3$	EA	$12^{\text{m}},66$	$12^{\text{m}},92$	2456408,95	1,3437	не выявлена
4	1350-08023794	$11^{\text{h}}54^{\text{m}}14^{\text{s}},11$ $+52^{\circ}19'20'',5$	BY	$13^{\text{m}},94$	$14^{\text{m}},08$	2456377,276	2,113	не выявлена
5	1425-07735907	$11^{\text{h}}54^{\text{m}}26^{\text{s}},71$ $+52^{\circ}41'36'',8$	EA	$13^{\text{m}},84$	$14^{\text{m}},71$	2456374,909	1,3069	не выявлена
6	1425-07736119	$11^{\text{h}}54^{\text{m}}32^{\text{s}},52$ $+57^{\circ}11'00'',9$	RRAB	$14^{\text{m}},13$	$14^{\text{m}},77$	2456409,258	0,44059	0,440509
7	1425-07744258	$11^{\text{h}}57^{\text{m}}53^{\text{s}},90$ $+53^{\circ}02'48'',2$	RRC	$13^{\text{m}},64$	$13^{\text{m}},93$	2456374,079	0,20228	не выявлена
8	1425-07747819	$11^{\text{h}}59^{\text{m}}23^{\text{s}},03$ $+53^{\circ}00'21'',4$	EA	$14^{\text{m}},98$	$15^{\text{m}},75$	2456374,118	2,239:	не выявлена
9	1350-08038347	$11^{\text{h}}59^{\text{m}}27^{\text{s}},09$ $+52^{\circ}12'24'',2$	RRAB	$15^{\text{m}},02$	$15^{\text{m}},5$	2456377,047	0,38858	0,388578
10	1425-07749499	$12^{\text{h}}00^{\text{m}}01^{\text{s}},51$ $+56^{\circ}13'52'',7$	BY	$13^{\text{m}},92$	$13^{\text{m}},99$	2456410,9	3,72:	не выявлена
11	1425-07756005	$12^{\text{h}}02^{\text{m}}38^{\text{s}},57$ $+52^{\circ}30'08'',6$	EA	$14^{\text{m}},63$	$14^{\text{m}},95$	2456373,877	1,8556:	не выявлена
12	1425-07758087	$12^{\text{h}}03^{\text{m}}29^{\text{s}},73$ $+53^{\circ}34'09'',5$	RRAB	$14^{\text{m}},87$	$15^{\text{m}},98$	2456377,211	0,55016	0,550122
13	1425-07760594	$12^{\text{h}}04^{\text{m}}33^{\text{s}},02$ $+55^{\circ}36'04'',3$	RRAB	$15^{\text{m}},32$	$16^{\text{m}},06$	2456409,281	0,62425	0,624261
14	1425-07765707	$12^{\text{h}}06^{\text{m}}37^{\text{s}},45$ $+55^{\circ}06'22'',6$	EW	$14^{\text{m}},97$	$15^{\text{m}},39$	2456410,355	0,29736	0,297271



Кривые блеска переменных звезд из таблицы

Переменные звезды в Большой Медведице.

К переменным звездам, которые не выявлены L. Palaversa и др., можно отнести типы EA и BY. Для алголей (EA-тип) характерно то, что большую часть времени блеск для них постоянен или изменяется незначительно. Изменение блеска алголей может достигать нескольких величин лишь во время непродолжительных затмений. Для звезд типа BY характерны квазипериодические изменения блеска, вызванные осевым вращением звезды с изменяющейся во времени поверхностной яркостью (пятнами) и хромосферной активностью.

Точность определения периода изменения блеска, приведенная L. Palaversa, выше, чем приведенная нами. Точность определения периода определяется погрешностью измерения момента максимума (минимума) $\Delta\epsilon$ и количеством N главных экстремумов за наблюдаемый период, погрешность периода составляет $\Delta P = \pm \Delta\epsilon / N$. Поэтому десятилетний интервал наблюдений LINEAR-обзора позволяет определить периоды с более высокой точностью.

Таким образом, в обсерватории СибГАУ было выявлено 14 новых переменных звезд по наблюдениям с марта по апрель 2013 г., периодичность некоторых из них подтверждена независимо астероидным обзором LINEAR и проверена по фотометрическим данным обзора Catalina Sky Survey. Для новых выявленных переменных звезд в Большой Медведице построены кривые блеска, приведенные к одному периоду, определены типы переменности, моменты главных экстремумов, диапазон изменения блеска, эпоха главного экстремума и период изменения блеска.

Библиографические ссылки

1. Four New Variable Stars in Ursa Major / S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin [et al.] // *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie. 2011. Vol. 11, no. 36. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>.
2. Veselkov S. A., Lapukhin E. G. New UV-type Variable Star in Lacerta // *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie. 2012. Vol. 12, no. 3. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.
3. New Eclipsing Variable Stars Discovered in Krasnoyarsk / S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin [et al.] // *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie. 2011. Vol. 11, no. 5. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1249491>.
4. New Variable Stars in Ursa Major: Area of $9^{\circ}.2 \times 2^{\circ}.3$, Centered at $\alpha = 13^{\text{h}}38^{\text{m}}$, $\delta = 53^{\circ}30'$ / E. G. Lapukhin, S. A. Veselkov [et al.] // *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 12, no. 10 (2012). URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1271192>.
5. New Variable Stars in Auriga: Area of $2^{\circ}.3 \times 2^{\circ}.3$, Centered at $\alpha = 06^{\text{h}}00^{\text{m}}$, $\delta = 29^{\circ}15'$ / E. G. Lapukhin, S. A. Veselkov [et al.] // *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie. 2012. Vol. 12, no. 10. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1273939>.
6. Variable Stars in Lyra: Area of $2^{\circ}.3 \times 2^{\circ}.3$, Centered at $\alpha = 19^{\text{h}}25^{\text{m}}.0$, $\delta = 42^{\circ}47'$ (2000.0) / E. G. Lapukhin, S. A. Veselkov [et al.] // *Peremennye Zvezdy*,

Prilozhenie. 2013. Vol. 13, no. 4. URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1273939>.

7. Sokolovsky K. V., Lebedev A. A. VaST: Variability Search Toolkit, A software package for detection of variable objects on a series of astronomical images [Электронный ресурс] : программа [сайт]. [2009]. URL: <http://scan.sai.msu.ru/vast/>.

8. New variable stars on digitized moscow collection plates. Field 66 ophiuchi (northern half) / Kolesnikova D. M., Sat L. A., Sokolovsky K. V. et al. // *Acta Astronomica*. 2008. Vol. 58, no. 3. P. 279.

9. Samus N. N. General Catalogue of Variable Stars (Samus+ 2007-2009), 2009yCat...102025S [Электронный ресурс] : каталог, ред. Н. Н. Самусь : [сайт]. [2007]. URL: <http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/gcvs/>.

10. The International Variable Star Index [Электронный ресурс] : database [сайт]. [2009]. URL: <http://www.aavso.org/vsx/>.

11. Горанский В. П. Программа поиска периодов переменных звезд (методы Лафлер-Кинман, Диминг, построение кривых блеска и т. д.) = WinEfK [Электронный ресурс] : В. П. Горанский, ГАИШ – CAO [сайт]. [2009]. URL: <http://www.variablestars.ru/FILES/winefk.rar>.

12. Palaversa L. [et al.] 2013. arXiv:1308.0357 [astro-ph.GA].

13. Catalina Sky Survey [Электронный ресурс] : Cone Search Service [сайт]. [2012]. URL: http://nesssi.cacr.caltech.edu/cgi-bin/getcssconedb_release.cgi.

References

1. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 11, no. 36 (2011). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>.
2. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 12, no. 3 (2012). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.
3. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 11, no. 5 (2011). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1249491>.
4. Lapukhin E. G. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 12, no. 10 (2012). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1271192>.
5. Lapukhin E. G. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 12, no. 10 (2012). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1273939>.
6. Lapukhin E. G. et al. *Peremennye Zvezdy*, Prilozhenie, vol. 13, no. 4 (2013). Available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1273939>.
7. Sokolovsky K. V., Lebedev A. A. VaST: Variability Search Toolkit, A software package for detection of variable objects on a series of astronomical images. Available at: <http://scan.sai.msu.ru/vast/>.
8. Kolesnikova D. M., Sat L. A., Sokolovsky K. V. et al. *Acta Astronomica*, 2008, vol. 58, no. 3, p. 279.
9. Samus N. N. General Catalogue of Variable Stars. Available at: <http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/gcvs/>.
10. The International Variable Star Index : database [web]. [2009]. Available at: <http://www.aavso.org/vsx/>.

11. Goranskii V. P. WinEfk software : [web]. [2009]. Available at: <http://www.variablestars.ru/FILES/win-efk.rar>.

12. Palaversa L., Ivezić Z., Eyer L. et al. 2013, arXiv: 1308.0357 [astro-ph.GA].

13. Catalina Sky Survey : Cone Search Service . Available at: http://nesssi.cacr.caltech.edu/cgi-bin/getcs-sconedb_release.cgi.

© Лапухин Е. Г., Веселков С. А., 2013

УДК 004.42

ОСОБЕННОСТИ ХРАНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПОТОКОВЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ*

А. И. Легалов¹, И. В. Матковский², А. В. Анкудинов¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: legalov@mail.ru

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: alpha900i@mail.ru

Представлены особенности хранилища (репозитория) функционально-потокowych параллельных программ, обеспечивающего создание распределенных библиотек функций и совместную разработку программного обеспечения. Показана специфика репозитория, его место в системе функционально-потокowego параллельного программирования. Описывается логическая структура хранилища и ее взаимосвязь с языком программирования. Применение репозитория обеспечивает поддержку эволюционного расширения программ без изменения ранее написанного кода и может использоваться для хранения не только функций, но и других программных объектов.

Ключевые слова: хранение программ, репозиторий, функционально-потокowego параллельное программирование, разработка программного обеспечения, расширение программ, инструменты для разработки программного обеспечения.

PECULIARITIES OF THE FUNCTIONAL DATAFLOW PARALLEL PROGRAM STORAGE

A. I. Legalov¹, I. V. Matkovsky², A. V. Ankudinov¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: legalov@mail.ru

²Siberian Federal University
69, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. E-mail: alpha900i@mail.ru

The peculiarities of the functional dataflow parallel program repository are presented. This repository makes it possible to use the distributed libraries of functions and support collective software development. The specificity of the repository and its place in the system of the functional dataflow parallel programming are shown. The logical structure and relationship with the programming language of repository are described. The usage of the repository allows to support the evolutionary expansion of the programs without changing of the early written code and can be used to store not only functions, but other software objects.

Keywords: repository, functional dataflow parallel programming, software development, program extension, software toolkits.

В настоящее время большинство языков программирования ориентируются на текстовое представление программ. При этом программа обычно размещается в нескольких файлах, каждый из которых может нести различную ролевую нагрузку, во многом определяемую спецификой построения конкретного языка программирования. Внутренняя структура этих фай-

лов также бывает различной и зависит как от специфики языка, так и от особенностей использования в нем того или иного файла. Из отдельных единиц компиляции программа может собираться в единый исполняемый модуль с применением различных инструментальных средств. На разных стадиях этого процесса используется препроцессорная обработка, ком-

* Работа поддержана грантом в рамках РФФИ № 13-01-00360 «Методы и средства эволюционной разработки программного обеспечения с применением процедурно-параметрической парадигмы программирования».

пиляция, статическая и динамическая компоновка, а также ручная сборка.

Решая конкретную задачу, программисту зачастую приходится манипулировать дополнительными понятиями, которые не несут семантически полезной нагрузки, связанной с предметной областью. Это обусловливается особенностями общей структуры программы, определяемой спецификой используемых инструментальных средств, а также необходимостью поддержки разнообразных критериев качества. В частности, раздельная компиляция удобна для написания расширяемых программ и позволяет модифицировать отдельные фрагменты кода, не затрагивая прочие единицы компиляции. Но для того, чтобы обеспечить повышение эффективности использования единиц компиляции, приходится применять дополнительные инструменты, такие как программы сборки проекта.

Существует тенденция организации процесса разработки программ таким образом, чтобы разработчик как можно меньше был связан с использованием промежуточных конструктивных понятий, а в большей степени ориентировался на применение тех сущностей, которые бы непосредственно определяли структуру программы. Для этого используются различные подходы, среди которых можно отметить:

- создание для уже разработанных языков программирования инструментальных средств, позволяющих скрыть служебные (вспомогательные) структуры и сервисы;
- разработка новых языков программирования, структура которых изначально старается избавиться от вспомогательных понятий.

Первый подход широко применяется на практике почти со всеми существующими языками. Он ориентирован на интегрированные среды разработки, отображающие только требуемые структуры. Примерами подобных сред являются MS Visual Studio [1], Qt Creator [2] и др. К достоинствам подхода можно отнести использование существующих языков программирования в новом окружении. Недостатки заключаются в том, что среда разработки становится громоздкой из-за поддержки как устаревших, так и новых методов создания программ. Старые концепции постоянно проявляются в различных аспектах разработки программного обеспечения.

Разработка новых языков программирования позволяет избавиться от использования «избыточных» технологических конструктивов. В этом случае с базовой файловой структурой можно непосредственно увязать «полезный» программный объект, например, класс или модуль. В связи с этим инструментальная поддержка процесса выполнения программ выстраивается вокруг только основных понятий языка программирования, используемых для описания предметной области. К достоинствам подхода следует отнести отсутствие промежуточных (вспомогательных) конструктивов, усложняющих лишними проектными решениями программу. Также отпадает необходимость в дополнительных инструментальных средствах. Среди недостатков можно отметить потерю гиб-

кости при разработке программ с учетом требуемых критериев качества. В частности, в ряде случаев возникают проблемы с эволюционным расширением программ. Для решения этих проблем часто требуется модификация изначально разработанного языка программирования путем включения в него вспомогательных конструкций, обеспечивающих достижение требуемых критериев качества в ходе разработки ПО. Примером такого развития языка является C# [3], в который добавлены возможности по расширению классов в различных файлах.

Таким образом, независимо от того, как развивается язык программирования, возможность использования только полезных конструктивов достигается за счет дополнительных инструментальных средств, таких как интегрированные среды разработки. Подобное решение используется и при расширении функциональных возможностей инструментальных средств, обеспечивающих программирование на языке «Пифагор» [4].

Целью работы является разработка репозитория, обеспечивающего хранение исходных текстов функций, а также различных внутренних представлений, формируемых в ходе создания на языке «Пифагор» функционально потоковых параллельных программ.

Специфика языка «Пифагор». Основной особенностью языка, влияющей на хранение в репозитории отдельных сущностей, является организация имен функций и трактовка (интерпретация, восприятие) этих имен с точки зрения общего пространства имен. Понимание пространства имен в языке «Пифагор» отличается от его трактовки в таких языках программирования, как C++ или C#. В языке отсутствует непосредственное описание пространств имен с использованием тех или иных аналогов описателя *namespace*. Вместо этого допускается написание составного имени функции, в котором отдельные идентификаторы отделяются друг от друга точкой. Самый последний идентификатор в этой цепочке имен определяет имя функции. Все предыдущие идентификаторы воспринимаются как подпространства имен, вложенные друг в друга. Это позволяет гибко расширять пространства имен, добавляя в них новые понятия (функции и константы) без изменения ранее написанных файлов, являющихся единицами хранения функций и констант.

В качестве примера рассмотрим функцию нахождения абсолютной величины числа, размещенную в пространстве имен Math:

```
Math.Abs << funcdef X {
    val << ({X:-},X);
    key << ((X,0):[<,>=]):?;
    return << val: key:.; }
```

Функция может быть записана в любом файле в сочетании с функциями, имеющими префиксы других пространств имен. Например, функция, осуществляющая нахождение скалярного произведения двух векторов, может находиться в пространстве имен Vector:

```
Vector.VVMult << funcdef Param {
  (Param:#:[:]:*) :VSum:return };
```

Функция может не содержать префиксов пространств имен:

```
// Функция, возвращающая произведе-
ние матрицы на скаляр
MSMult << funcdef Param {
  A << Param:1;
  (A, (Param:2,A:|):dup):#:[:]:VSMult
:(.):return };
```

В этом случае предполагается, что она хранится во внешнем (безымянном) пространстве, расположенном на самой вершине иерархии пространств имен.

Навигация по такой системе функций, составляющих единую библиотечную среду, становится неудобной. Необходимо таким образом организовать их хранение, чтобы иерархия пространств имен, формируемая децентрализованно, составляла в результате единое логическое и физическое пространство, доступное программисту.

Логическая структура репозитория. В соответствии с особенностями языка функционально-поточкового параллельного программирования «Пифагор», логическая структура репозитория, предназначенного для хранения функций, должна представлять иерархическую структуру, состоящую из вложенных подпространств имен, исходные тексты функций и констант, их промежуточные представления и прочие данные. Описание данной структуры можно выразить с использованием следующих правил:

Репозиторий = Заголовок БезымянноеПространствоИмен.

Заголовок = ИмяРепозитория.

Безымянное пространствоИмен =

[Функции] [ИменованныеПространства]
[Константы].

Функции = Функция {Функция}.

Константы = Константа {Константа}.

ИменованныеПространства =

ИменованноеПространство { ИменованноеПространство}.

Функция = ИмяФункции ИсходныйТекстФункции
ПромежуточныеПредставленияФункции.

Константа = ИмяКонстанты ИсходныйТекст-
Константы

ПромежуточныеПредставленияКонстанты.

ИменованноеПространство = Заголовок

Функции [ИменованныеПространства]

[Константы] |

[Функции] ИменованныеПространства

[Константы] |

[Функции] [ИменованныеПространства]

Константы].

Имя... = Идентификатор.

В качестве примера можно рассмотреть формирование репозитория для функций, приведенных выше. Пусть будет создан пользовательский репозиторий с именем **MyRepository**. Тогда хранимые в нем данные можно представить в виде иерархии:

```
MyRepository
MSMult
-- Исходный текст функции
MSMult
Math
Abs
-- Исходный текст функции
Math.Abs.
Fact
-- Исходный текст функции
Math.Fact
Vector
VVMult
-- Исходный текст функ-
ции Vector.VVMult
```

Физическая структура репозитория. Иерархическая структура хранилища, обеспечиваемая репозиторием, может быть организована с применением различных подходов. В качестве возможных вариантов можно выделить использование файловой системы или систему управления базами данных (СУБД). Организация репозитория хорошо ложится на структуры современных файловых систем. Это позволяет обеспечить достаточно быструю реализацию основных функций, опираясь только на системные вызовы используемых операционных систем. Применение переносимых библиотек для организации работы с файловыми системами, таких как boost, Qt и др., позволяет создавать программное обеспечение, обеспечивающее функционирование репозиториев на различных операционных системах. Аналог подобного решения применен в ранее реализованных проектах с использованием библиотеки Qt. Вместе с тем следует отметить, что реализация репозитория на основе файловой системы затрудняет добавление дополнительных функций, таких как поиск по репозиторию, навигация, фильтрация расположенных в нем данных, а также замедляет их работу.

Реализация вспомогательных функций более эффективно осуществляется при использовании СУБД. В этом случае применяется дополнительная инструментальная поддержка работы с данными, что ведет к повышению эффективности процесса разработки. К преимуществам данного подхода можно отнести использование различных вариантов архитектуры «клиент–сервер». Его недостатками являются использование более сложной инструментальной поддержки и необходимость дополнительной реализации системы поддержки версий в случае коллективной работы над репозиторием.

Инструментальная поддержка репозитория. Среди основных требований к репозиторию можно выделить:

- децентрализованное хранение данных, при котором каждый из разработчиков может создавать свой репозиторий;

- поддержка коллективной разработки библиотек и версий отдельных функций;

- автоматический учет зависимостей выбранной функции;

- удаленный доступ;

- разграничение прав доступа к отдельным элементам репозитория и ко всему в целом;

- осуществление поиска внутри репозитория;

- возможность полного или частичного исполнения выбранной функции на стороне репозитория;

- графический интерфейс пользователя.

Приняв во внимание описанные выше требования, а также взаимосвязь данного модуля с другими подсистемами разрабатываемого программного комплекса, можно прийти к заключению о необходимости создания клиент-серверного программного обеспечения класса хранилища данных, поддерживающего распределенную модель хранения данных. При этом процесс взаимодействия пользователя репозиторием может быть описан с помощью следующих обобщенных шагов:

- 1) запускается клиентская часть системы;

- 2) с помощью средств разработки пишется разрабатываемая функция;

- 3) при необходимости проводится сохранение написанного исходного кода в заданном репозитории;

- 4) после этого осуществляется запись функции в репозиторий. При этом будет проведен синтаксический анализ, проанализированы зависимости между создаваемой и вызываемыми функциями, а результаты анализа будут записаны в таблицу зависимости функций.

Проанализировав и приняв во внимание положительные и отрицательные стороны описанных выше вариантов организации репозиториев, можно прийти к выводу о необходимости реализовать клиент-серверное программное обеспечение в виде хранилища данных с базовым набором функциональных возможностей, упомянутых ранее, и возможностью их дальнейшего наращивания. При этом на начальном этапе имеет смысл разработать и реализовать работу с локальным репозиторием, что позволит отработать базовые алгоритмы сборки программы.

Варианты использования репозитория. Доступ к используемым репозиториям осуществляется в зависимости от взаимного расположения библиотечных функций и функций, разрабатываемых программистом. Если разрабатываемые функции расположены в том же репозитории, что и используемые библиотечные функции, то специального указания о подключении репозиториев не требуется. В этом случае вновь создаваемая функция напрямую обращается к используемой библиотечной функции с указанием полного имени в соответствии с ее пространством имен.

Например, если библиотечная функция вычисления квадратного корня *sqrt* размещается в текущем репозитории в пространстве имен *math.elementary*, то доступ к ней осуществляется по имени

math.elementary.sqrt. При разработке функции вычисления диагонали квадрата по заданной стороне, расположенной в том же хранилище, но в пространстве имен *user.figures.square*, получим следующее решение:

```
user.figures.square.diagonal <<
funcdef a {
    (a,a):* >> aa;
    (aa,aa):+:math.elementary.sqrt >>
return; }
```

В том случае, если библиотечный репозиторий размещен в другом месте, то для доступа к нему используется оператор импорта. При этом местоположение репозитория указывается с применением широко используемого механизма URL (Universal Resource Locator). Пусть библиотечный репозиторий располагается в отдельном каталоге пользователя, например, */home/username/lib-repo/* на этом же компьютере, что разрабатываемый код. Тогда разрабатываемая функция будет выглядеть следующим образом:

```
sqrt << import
"file://home/username/lib-
repo/math.elementary.sqrt";
user.figures.square.diagonal <<
funcdef a {
    (a,a):* >> aa;
    (aa,aa):+:sqrt >> return; }
```

Возможна также ситуация, когда в разрабатываемой функции используются несколько функций из библиотечного репозитория. В этом случае можно указать только путь к нему, подставив вместо подпространств имен и имен библиотечных функций звездочку «*». Приведенная в качестве примера функция будет выглядеть следующим образом:

```
ext_repository << import
"file://home/username/lib-repo/*";
user.figures.square.diagonal <<
funcdef a {
    (a,a):* >> aa;
    (aa,aa):+:
ext_repository.math.elementary.sqrt >>
return; }
```

В качестве URL может быть указан и удаленный репозиторий, расположенный, например, на ftp- или http-сервере. Тогда в операторе импорта задается соответствующий URL с указанием сервера. Например:

```
ftp_repository << import
"ftp://ftp_server_name/*";
http_repository << import
"http://http_server_name/*";
```

Интеграция языковых и инструментальных средств повышает эффективность процесса разработки программного обеспечения, предоставляет в распоряжение программиста новые возможности по сопровождению и расширению программ, скрывая при этом многие вспомогательные операции, напрямую не связанные с решаемой прикладной задачей. Предлагаемый репозиторий, обеспечивающий распределенное хранение функционально-поточковых параллельных программ, позволяет повысить эффективность совместного использования разрабатываемых программ, накопление и обмен создаваемыми библиотечными функциями. Помимо этого предлагаемые методы могут также использоваться при разработке других иерархических распределенных хранилищ, например, при расширении обобщенных записей и обобщающих процедур в процедурно-параметрическом программировании [5]. Ряд функций, обеспечивающих распределенное хранение данных, также использован в системе многокритериального анализа [6].

Библиографические ссылки

1. Хортон А. Visual C++ 2005: базовый курс : пер. с англ. М. : Вильямс, 2007. 1152 с.
2. Шлее М. Qt 4.8. Профессиональное программирование на C++. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 894 с.
3. Троелсен Э. C# и платформа .NET. Библиотека программиста : пер. с англ. СПб. : Питер, 2003. 800 с.
4. Легалов А. И. Функциональный язык для создания архитектурно-независимых параллельных про-

грамм // Вычислительные технологии. 2005. № 1 (10). С. 71–89.

5. Легалов А. И., Солоха А. Ф. Особенности языка процедурно-параметрического программирования // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер. Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 3. С. 15–22.

6. Легалов А. И., Ледяев Д. Н., Анкудинов А. В. Инструментальная поддержка многокритериального анализа при разработке сложных технических систем // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 2 (23). С. 50–55.

References

1. Horton I. *Visual C++ 2005: bazoviy kurs* [Beginning Visual C++ 2005]. Moscow, I. D. Williams publ., 2007, 1152 p.
2. Schlee M. *Qt 4.8. Qt 4.8. Professionanoel programirovanie na C++* [Qt 4.8. C++ Professional Programming]. Saint-Petersburg, BHW-Petersburg, 2012, 894 p.
3. Troelsen A. *C# i platforma .NET* [C# and the .NET Platform]. Sanct-Petersburg, Piter, 2003, 800 p.
4. Legalov A. I. *Vychislytel'nye tehnologii*. 2005, № 1 (10), p. 71–89.
5. Legalov A. I., Soloha A. F. *Vestnik NGU, Information technologies*. 2011, vol. 9, № 3, p. 15–22.
6. Legalov A. I., Ledyayev D. N., Ankudinov A. V. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 2 (23), p. 50–55.

© Легалов А. И., Матковский И. В., Анкудинов А. В., 2013

УДК 62.501

О НЕКОТОРЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ

А. В. Медведев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru

Рассматриваются некоторые аспекты системного анализа и теории исследования операций. Обсуждаются также наиболее важные основные черты последних. Приводится конкретный пример эффективного применения системного анализа в задаче управления техническим объектом. Анализируются некоторые вопросы информатизации управленческих решений для различных процессов, включая организационные. Описаны некоторые принципиальные особенности создания систем моделирования и управления активными объектами. Выделены наиболее важные задачи системного анализа. Дается краткая характеристика исследований в области системного анализа и исследования операций, проводимых в течение последних лет на кафедре системного анализа и исследования операций СибГАУ.

Ключевые слова: активные системы, сложные процессы, априорная информация, критерии, ограничения, обучающиеся модели, алгоритмы оптимизации, принятие решений.

ABOUT SYSTEM ANALYSIS AND OPERATION RESEARCH THEORY

A. V. Medvedev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru

The paper considers some aspects of system analysis and operation research theory. The most important features of the last ones are discussed. The particular example of the system analysis effective use in the problem of technical object control is given. Some informatization aspects by making solutions for different processes including organizational ones are analyzed. The principal features of modeling systems building and active objects control are described. The most important problems of system analysis are pointed out. A brief characteristic of investigations having done in the department "System analysis and operation research" of SibSAU in the sphere of system analysis and operation research is given.

Keywords: active systems, complex processes, a priori information, criteria, restrictions, learning model, optimization algorithms, decision making.

В настоящее время часто употребляют выражения: «системный анализ», «системный подход к изучению явлений», «теория систем». И это неслучайно. Наука вступила в ту фазу своего развития, когда приходится иметь дело с явлениями не просто сложными, а комплексными, явлениями, в основе которых лежат процессы разной природы, для анализа которых должны использоваться различные, но связанные между собой модели. Системный анализ и возникающая в его рамках технология исследований становятся все более и более необходимыми, интерес к системному анализу и системной проблематике диктуется вполне реальной потребностью. Часто, например, делается вид, что системный анализ – это некое открытие. Как будто до этого все думали бессистемно. В одной из бесед Н. Н. Моисеев¹ при обсуждении этого вопроса заметил: «А что, Александр Македонский воевал бессистемно?». На самом деле наука подготавливала переход от изучения отдельных фактов к изучению сложных систем моделей. Лучшей школой системного анализа является физика, где создана стройная система связанных между собой моделей. Конечно, модели и математические методы начинают проникать всюду, даже в историю. Но система моделей создана пока только в физике.

Системный анализ – это дисциплина нематематическая. Большую роль в развитии системного мышления, а следовательно, и системного анализа играет изучение естественно-научной классики. И один из таких источников системного мышления – это великая школа русских и советских естествоиспытателей. Достаточно вспомнить Д. И. Менделеева, создавшего «модель химии». В. И. Вернадский был первым, который установил единство и взаимосвязь биосферы как единого комплекса. Создатель биогеохимии, он показал не только глубокую связанность органических и неорганических процессов, но и установил связь характерных времен протекания основных процессов. А это уже ключ к построению рациональных схем формализованного анализа.

Напомним некоторые определения из области системного анализа, которые можно отнести к категории общепринятых (Большая советская энциклопедия).

¹ Н. Н. Моисеев – академик АН СССР, лауреат государственных премий СССР. В 1978–1980 гг. неоднократно приезжал в город Красноярск для участия в формировании программ суперпрограммы «Сибирь» по приглашению академика АН СССР А. С. Исаева, бывшего тогда председателем Красноярского научного центра.

Система (от греч. sy'stēma – целое, составленное из частей; соединение) – это множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство.

Системный анализ: 1) в узком смысле – совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам политического, военного, социального, экономического, научного, технического характера; 2) в широком смысле термин «системный анализ» иногда (особенно в англоязычной литературе) употребляют как синоним системного подхода.

Системный подход: направление методологии специально-научного познания и социальной практики, в основе которого лежит исследование объектов как систем.

Что же является главным, «сердцевиной» системного анализа? По мнению профессора Ф. П. Тарасенко, главным является «вытаскивание» проблемы из реальной жизни, отделение важного от несущественного, поиск правильной формулировки для каждой из возникших задач» [1]. Подобную же мысль высказывает Н. Н. Моисеев относительно постановки различных задач оптимизации. Этот этап чаще всего обходится молчанием со стороны многих авторов, хотя, безусловно, все относят его к категории важнейших. Здесь уместно вспомнить известную фразу Д. Д. Бернала: «Гораздо труднее увидеть проблему, чем найти ее решение. Для первого требуется воображение, а для второго – только умение». В проблематике системного анализа «вытаскивание» проблемы из реальной жизни имеет первостепенное значение. Отметим еще одно нетривиальное обстоятельство, связанное с формализованными постановками задач, формирующих системную проблему, которое состоит в том, что мы вынуждены отходить от математической строгости, имея дело с реальностью. По-видимому, можно считать справедливым мнение Б. Мандельброта, что «возможность применять к реальности строгое математическое понятие непрерывности сводится почти на нет». Здесь идет речь о непрерывности, хотя проблема использования математической строгости к реальным задачам гораздо шире. Таким образом, в подавляющем числе случаев математически строгая постановка задач, отражающих реально протекающие процессы, представляется весьма сомнительной. На это же обращал внимание Я. З. Цыпкин²: «До самого

² Я. З. Цыпкин – академик АН СССР, лауреат Ленинской премии.

последнего времени теория оптимальности строилась на элегантно с математической точки зрения и очень шатком с точки зрения практических задач основании».

Еще одним важным направлением, примыкающим к системному анализу, является информатика. Не вдаваясь в детальное обсуждение этого направления, приведем некоторые высказывания известных ученых, стоявших у ее истоков.

Академик А. П. Ершов: «...этот термин (информатика) снова, уже в третий раз, вводится в русский язык в новом и куда более широком значении – как название фундаментальной естественной науки, изучающей процессы передачи и обработки информации». И далее: «...отнесение информатики к фундаментальным наукам отражает общенаучный характер информации и процессов ее обработки».

Академик В. М. Глушков: «Понятие информатики охватывает области, связанные с разработкой, созданием, использованием и материально-техническим обслуживанием систем обработки информации, включая машины, оборудование, математическое обеспечение, организационные аспекты, а также комплекс промышленного, коммерческого, административного, социального и политического воздействия». Эту мысль комментирует академик Е. П. Велихов: «Это очень широкое определение, его нужно конкретизировать, но в нем выделено главное – понятие о вычислительной технике и автоматизации, которые не существуют отдельно друг от друга».

Академик А. А. Дородницын: «...состав информатики – это три неразрывно и существенно связанные части: технические средства, программные и алгоритмические».

Академик В. С. Михалевич: «Информатика – комплексная научная и инженерная дисциплина, изучающая все аспекты разработки, проектирования, создания, оценки, функционирования механизированных (основанных на ЭВМ) систем переработки информации, их применения и воздействия на различные области социальной практики. Появление этой дисциплины обусловлено возникновением и распространением новой – индустриальной – технологии сбора, обработки, передачи информации, связанной с фиксацией данных на машинных носителях». И далее: «Наиболее широко распространенной информационной технологией, играющей исключительно важную роль в жизнедеятельности общества, выступает технология управления».

«Информатика – дисциплина, изучающая структуру и общие свойства научной информации, а также закономерности ее создания, преобразования, передачи и использования в различных сферах человеческой деятельности» (БСЭ).

Из всего сказанного следует, что информатика представляется синтезом многих отраслей наук и знаний. Во второй половине нашего столетия возникла предшествующая информатике новая научная дисциплина – кибернетика, которая также является синтезирующей наукой, получившей довольно быстрое развитие в разнообразных областях деятельности че-

ловека: экономике, технике, биологии, медицине и др. В это же время К. Э. Шенноном была создана изящная и глубокая теория информации, где информация представляет собой объект исследования. Информацию как философскую категорию стали рассматривать как один из важнейших атрибутов материи, отражающей ее структуру. Понимание единой природы информации вслед за установлением единой природы вещества и энергии может стать важнейшим шагом к постижению материального единства мира.

Предшественницей информатики, естественно, можно считать кибернетику. Кибернетика акцентирует внимание на общих законах движения информации в целенаправленных системах любой природы (биологических, технических, социальных), на структурном подобии сложных систем. Информатика, опираясь на этот теоретический фундамент, изучает технологию, конкретные способы и приемы переработки, передачи, использования информации.

Кибернетика (от греч. κυβερνητική) – искусство управления, наука об управлении, связи и переработке информации. Впервые этот термин встречается у Платона (IV в. до н. э.). Спустя столетия его использовал А. М. Ампер (1834 г.) как определение науки об управлении человеческим обществом. Наконец, в 1948 г. вышла книга Норберта Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине». В частности, Н. Винер вспоминает: «...Между прочим, впоследствии я обнаружил, что этот термин был уже употреблен Андре Ампером в отношении политической науки и был введен в другом контексте одним польским ученым, причем оба этих употребления относятся к первой половине XIX в.». Н. Винер имеет в виду, наверное, польского философа-геллеянца Фердинанда-Бронислава Трентовского, который читал лекции во Фрейбургском университете, содержание которых опубликовал на польском языке в 1843 г. в книге «Отношение философии к кибернетике как к искусству управления народом». Главная цель, которую он преследовал в своей книге, состояла в построении научных основ практической деятельности руководителя («кибернета»): «Применение искусства управления без сколько-нибудь серьезного изучения соответствующей теории подобно врачеванию без сколько-нибудь глубокого понимания медицинской науки».

Кибернетические принципы не зависят от частных систем, а принципы информатики всегда в технологической связи именно с реальными системами. Действительно, широкое использование вычислительной техники, и прежде всего ЭВМ, создало «критическую массу», когда стала возможна безбумажная обработка, передача и хранение информации. Отсюда можно ожидать и появления новых методов и принципов обработки информации, которые будут порождены компьютерной безбумажной технологией ее обработки. В настоящее время информатика представляется отраслью знания, имеющей своей задачей создание на основе технических, алгоритмических и программных средств информационной технологии обработки (в широком смысле этого слова) информации в раз-

личных областях деятельности человека и с разными целями. Совершенно очевидно, что это повлечет за собой не только изменение приемов, стиля и характера работы человека в условиях информационных технологий, но отразится на психологических аспектах его деятельности, что может оказаться наиболее важным, и прежде всего, потому, что на этом этапе будут накоплены необходимые знания и опыт, которые создадут ту «критическую массу», когда будут отчетливо видны атрибуты новой фундаментальной отрасли знаний.

В дальнейшем мы под информатизацией будем понимать компьютерные безбумажные технологии обработки, хранения и переработки информации, ориентированные на конкретные предметные области деятельности человека и преследующие вполне определенные цели. Системный анализ, прародителями которого можно считать кибернетику и информатику, является наукой (искусством) «вхождения» в проблему с целью ее ликвидации или, по крайней мере, «ослабления», без порождения эквивалентных проблем.

Организационный процесс. Одним из наиболее важных направлений в системном анализе являются моделирование и управление активными системами, которые предполагают наличие человека или коллектива людей, «встроенных» в исследуемый процесс [2; 3]. Подобные системы часто называют еще организационными. Рассмотрим достаточно детально схему локальной организационной системы (рис. 1), где A – неизвестный оператор объекта: $x(t)$, $q(t)$, $z(t)$ – выходные переменные процесса; $u(t)$ – управляющее воздействие; $\mu(t)$ – входная контролируемая, но неуправляемая переменная процесса; $\omega(t)$ – переменная, характеризующая промежуточное состояние процесса, дающая дополнительную информацию о его протекании; $\theta(t)$ представляет собой воздействие на объект внешней среды. Для организационных систем это могут быть какие-либо распоряжения, постановления, приказы, а также законодательные акты, которые с течением времени претерпевают те или иные изменения. Входная переменная $\lambda(t)$ не поддается контролю, $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие, t – непрерывное время, H^μ , H^u , H^x , H^θ , H^ω , H^q , H^z – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие средства контроля, устройства для измерения наблюдаемых переменных, μ_i , u_i , x_i , θ_i , q_i , z_i , ω_i – означают наблюдение $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $\theta(t)$, $q(t)$, $z(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время t . Контроль переменных (x , u , μ , θ , q , z) осуществляется через некоторый интервал времени, т. е. x_i , u_i , μ_i , θ_i , q_i , z_i , ω_i , $i = \overline{1, s}$ – выборка измерений переменных процесса $(x_1, u_1, \mu_1, \theta_1, q_1, z_1, \omega_1)$, $(x_2, u_2, \mu_2, \theta_2, q_2, z_2, \omega_2)$, ..., $(x_s, u_s, \mu_s, \theta_s, q_s, z_s, \omega_s)$, ..., s – объем выборки, $h^\mu(t)$, $h^x(t)$, $h^u(t)$, $h^\omega(t)$, $h^\theta(t)$, $h^q(t)$, $h^z(t)$ –

случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

Отметим существенное отличие выходных переменных $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$, представленных на рис. 1. Выходная переменная $x(t)$ контролируется через интервалы времени Δt , как и входные переменные, а $q(t)$ контролируются через существенно большие интервалы времени ΔT , $z(t)$ – через T ($T \gg \Delta T \gg \Delta t$). С практической точки зрения для исследуемого процесса наиболее важным часто является контроль переменных $z(t)$. Этим и обусловлено существенное отличие дискретности контроля выходных переменных $q(t)$ и $z(t)$. Стрелки, помещенные внутри объекта (рис. 1), символизируют наличие в объекте человека (коллектива людей).

Выходная переменная процесса $x(t)$ определяется следующим образом:

$$x(t) = A(u(t - \tau), \mu(t - \tau), \lambda(t - \tau), \theta(t - \tau), \xi(t), t). \quad (1)$$

Не следует путать запаздывание τ , присущее процессу, и запаздывание (задержку) при измерении или оценке тех или иных переменных процесса.

Модель исследуемого процесса $x(t)$ может быть представлена следующим образом:

$$\hat{x}(t) = \hat{A}_x(u(t - \tau), \mu(t - \tau), \omega(t - \tau), \theta(t - \tau), t). \quad (2)$$

При прогнозировании $q(t)$ и $z(t)$ целесообразно использовать следующие модели:

$$\begin{aligned} \hat{q}(t) &= \hat{A}_q(u(t - \tau), \mu(t - \tau), \\ &\omega(t - \tau), \theta(t - \tau), \hat{x}(t), t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{z}(t) &= \hat{A}_z(u(t - \tau), \mu(t - \tau), \\ &\omega(t - \tau), \theta(t - \tau), \hat{x}(t), \hat{q}(t), t), \end{aligned} \quad (4)$$

где τ – запаздывания, различные по соответствующим каналам связи (из соображений простоты мы используем одно и то же обозначение). Хотя в настоящей работе при написании моделей используются вещественные переменные, тем не менее ясно, что переменные могут быть из различных измерительных шкал. Это обстоятельство, конечно же, нельзя обойти при исследовании реальных социально-экономических процессов [4]. Различные методы, используемые при построении параметрических моделей, изложены в [1], а непараметрических – в [3].

Сделаем одно важное замечание. А. А. Фельдбаум называл динамические объекты – объектами с памятью. Представляется, что последнее имеет более глубокий смысл, чем отождествление моделей объектов управления с дифференциальными уравнениями. Рассмотрим локальный канал « $u(t)$ – $x(t)$ » из рис. 1. Действительно, в объекте с памятью значение выходной его переменной x_i в дискретные моменты времени зависит от x_{i-1} , x_{i-2} , ..., x_{i-n} , где n – «глубина» памяти. Тогда, в частности, модель объекта с памятью может быть представлена в виде

$$\hat{x}_i = \sum_{i=1}^n \gamma_i \varphi_i(x_{i-i}) + \beta u_i, \quad (5)$$

где $\gamma_i, i = \overline{1, n}$, β_i – неизвестные коэффициенты; $\varphi_i, i = \overline{1, n}$ – некоторая система функций. Разработка и исследование моделей класса (5) представляется весьма перспективным.

Управление активной системой. При исследовании организационных систем, при разработке для них средств моделирования и управления, в отличие от технических, все обстоит совсем иначе. Главным отличием систем управления активными процессами от вышеназванных является то, что все или большая часть блоков, входящих в нее, также являются активными системами (рис. 1). Кроме того, в активных системах при их изучении невозможно «размыкание» встроенных в них обратных связей, в то время как в технических системах это в большинстве случаев возможно, что нашло отражение в задачах идентификации в условиях текущего функционирования объекта.

На рис. 2 введем следующие обозначения: О – объект управления; БПРУ – блок процесса реализации управления; УУ – управляющее устройство; УПР – управление процессом реализации выработанного УУ управляющего воздействия; БКО – блок контроля и оценки компонент вектора выходных переменных

управляемого процесса; УС БКО – управляющая система БКО; КУУ – корректирующее управляющее устройство блоком УУ; БФЗВ – блок формирования задающих воздействий, ВС – внешняя среда, $\langle * \rangle$; $\langle ** \rangle$ – задающее воздействие. Еще раз заметим, что все блоки, входящие в систему управления активным объектом (процессом), сами являются активными. Это принципиальное отличие систем управления активными системами от систем управления техническими, технологическими, производственными и многими другими процессами, хотя и последние не исключают участия человека в процессе функционирования соответствующих блоков системы управления.

Приведенная выше схема управления активным объектам, конечно же, носит довольно общий характер. При разработке системы управления конкретным активным объектом необходимо соответствующее наполнение содержанием всех блоков системы. Важнейшим этапом на этом пути будет комплексное использование всей априорной информации, обучающих выборок и т. п. Тем не менее, вопрос формирования обучающих выборок является настолько важным, что требует специального рассмотрения.

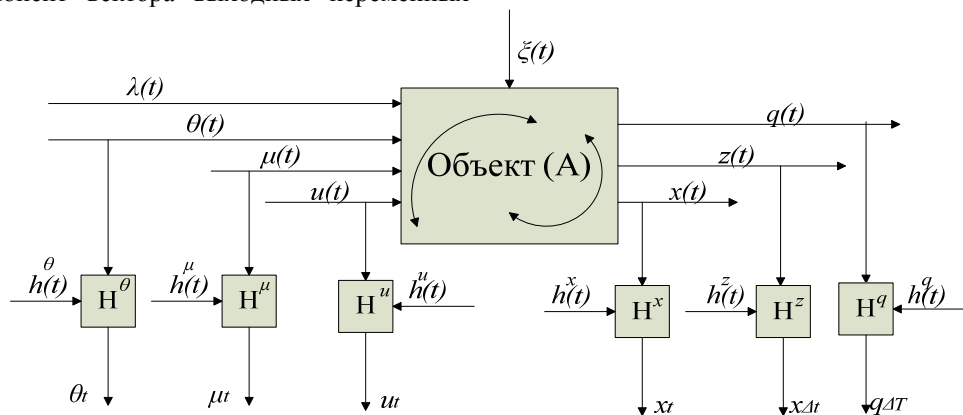


Рис. 1. Общая схема многомерного активного процесса

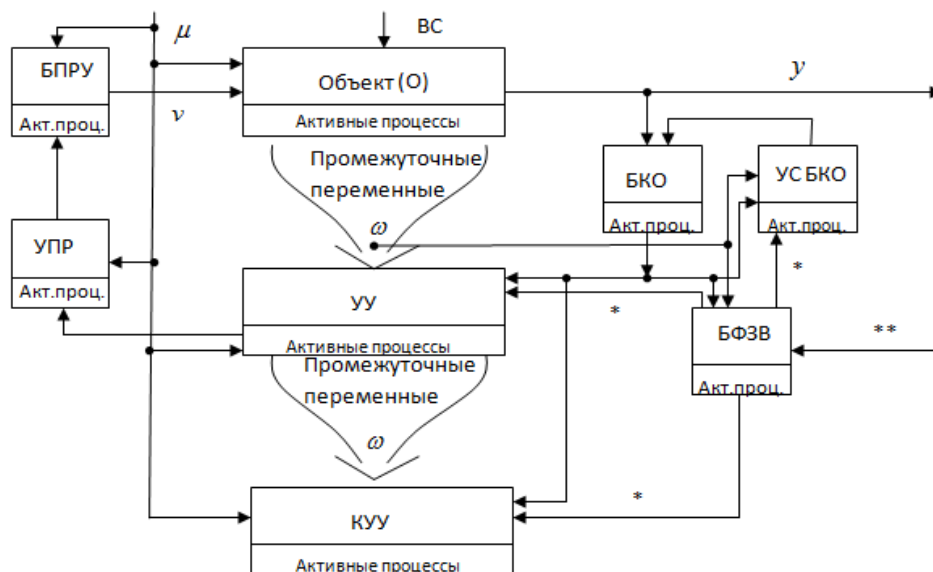


Рис. 2. Общая схема системы управления активным процессом

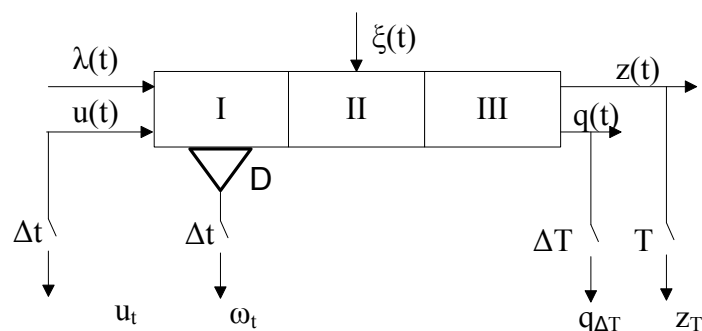


Рис. 3. Процесс измельчения клинкера мельницей сухого помола

Пример. Рассмотрим конкретный пример «вытаскивания» проблемы из реальности. В качестве реальности рассматривается процесс измельчения клинкера мельницей сухого помола. Клинкер – это продукт обжига в цементном производстве, представляющий собой гранулы размером 1,5–3 см в диаметре. Проиллюстрируем это на рис. 3.

Мельница сухого помола представляет собой цилиндрический вращающийся барабан, разделенный сеточными перегородками на три камеры, загруженные мелющими телами (в I камере – достаточно крупные металлические шары, во II камере – шары меньшего размера, в III камере – цилиндры небольшого размера). Клинкер, поступающий в мельницу, измельчается в I, II, III камерах и превращается в цемент. Таким образом, с технологической точки зрения входом мельницы является загрузка клинкера, а выходом – цемент.

На вход объекта поступают: управляемая контролируемая со случайными ошибками переменная $u(t)$ (загрузка/количество клинкера) и неуправляемая неконтролируемая переменная $\lambda(t)$ (размываемость клинкера). Переменная $\lambda(t)$ является важным технологическим показателем размываемости клинкера (продукт печи обжига), существенно влияющим на процесс измельчения последнего, но не может быть измерена в реальном времени. Возможны, конечно, экспертные оценки размываемости клинкера, а также анализ одной его гранулы средствами петрографии и др., но все они требуют длительного времени, очень трудоемки, не представительны и дают грубые результаты. На процесс оказывает влияние векторное случайное воздействие $\xi(t)$ (электромагнитное излучение от сварки, шумы от соседних мельниц и др.). Это воздействие, как и $\lambda(t)$, является неконтролируемым и неуправляемым. Однако природа этих переменных различна. Конечно, с математической точки зрения можно их совместить. Но с практической точки зрения совмещать размываемость клинкера с излучением от сварки является нецелесообразным. Переменная $\omega(t)$ – шум в первой камере, контролируемый индукционным датчиком D через интервал Δt , который в существующих системах регулирования используется как выходной сигнал процесса измельчения. Выход мельницы $q(t)$ (тонкость из-

мельчения) измеряется через интервал времени $\Delta T \gg \Delta t$; $z(t)$ – основной показатель качества цемента (активность, прочность цементной балочки при сжатии), контролируемый через $T \gg \Delta T \gg \Delta t$. Постоянная времени объекта примерно 5–7 минут, $u(t)$ и $\omega(t)$ в локальных аналоговых системах регулирования контролируются непрерывно, а в цифровых системах регулирования – дискретно через интервал Δt . Контроль выходных переменных $q(t)$, $z(t)$ осуществляется в лаборатории по технологии, регламентируемой ГОСТ, причем $\Delta T = 2$ ч, а $T = 28$ сут. Отметим, что $q(t)$ – технологический показатель собственно процесса измельчения, а $z(t)$ – основной показатель качества (марки) цемента, который зависит не только от тонкости измельчения $q(t)$, но и от показателей работы предыдущих технологических переделов – приготовления сырьевой смеси, помола, обжига. В частности, из вышеописанного видно, что технология контроля переменных, существенно влияющих на процесс измельчения, трудоемка, осуществляется через различные интервалы времени, сильно «зашумлена», что приводит к серьезным трудностям при моделировании подобных процессов. А ведь это сравнительно простой технологический процесс, который типичен для многих отраслей промышленности. Наконец, заметим, что он не укладывается в классическую схему задач идентификации.

Существующая система регулирования имеет вид, представленный на рис. 4, где P – ПИ-регулятор; ИМ – исполнительный механизм (тарельчатый питатель). На выходе III камеры установлена достаточно мелкая сетка. Под влиянием различных факторов (размываемость клинкера и др.) эта сетка может забиваться («запаривается»). При этом на вход мельницы продолжает поступать клинкер в прежних объемах, что приводит к забиванию камер мельницы и выходу ее из нормального режима функционирования. Мельница прекращает производить цемент. В этой ситуации прекращается подача клинкера, а мельница продолжает работать вхолостую длительное время. Лишь после этой процедуры процесс производства возобновляют. Возникает проблема, как избежать эффекта «запаривания».

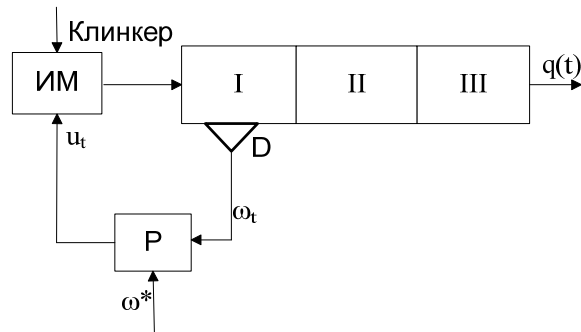


Рис. 4. Существующая система регулирования

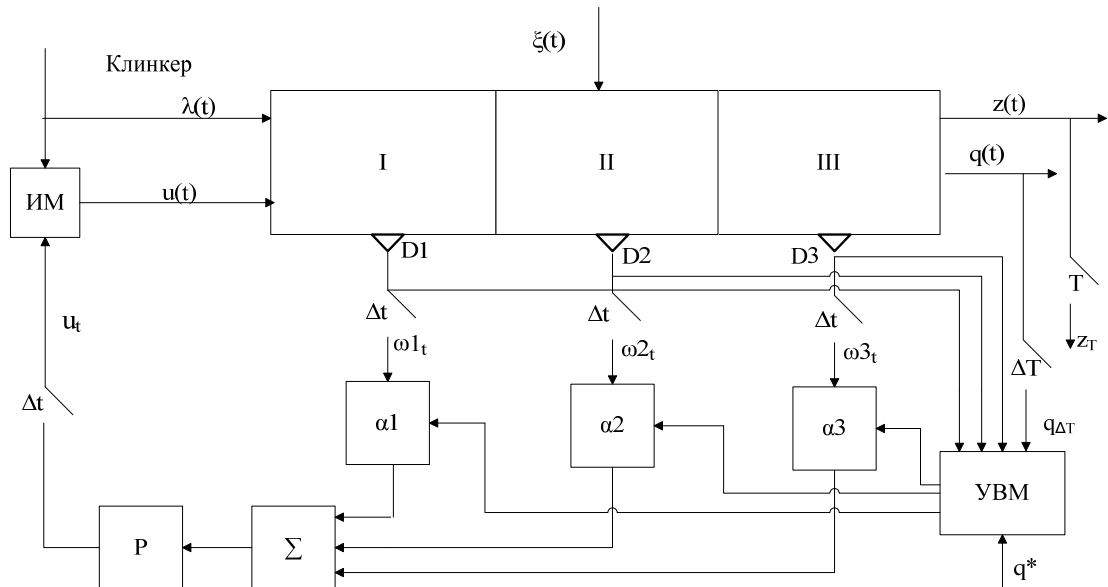


Рис. 5. Предложенная схема управления

В результате системного анализа существующей типовой системы управления мельницей сухого помола была предложена схема, представленная на рис. 5. В сравнении с предыдущей схемой управления здесь каждая камера мельницы снабжена собственным индукционным датчиком (D1, D2, D3). Сигнал датчика является косвенным показателем степени заполнения камеры клинкером. В начальной схеме (рис. 5) датчик D располагается только в начале первой камеры. «Запаривание» и накопление клинкера в последующих камерах этот датчик не «чувствует». Введение индукционных датчиков в камеры II и III позволило устранить этот недостаток. При «запаривании» сетки в камере III на начальной стадии сигнал датчика D3 уменьшается. Как видно по рис. 5, сигналы от индукционных датчиков подаются на регулятор с некоторыми весовыми коэффициентами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (здесь блок Σ – сумматор). Значения этих коэффициентов во многом зависят от качества исходного материала, от размалываемости клинкера, т. е. от значения переменной $\lambda(t)$. Как было сказано ранее, переменная $q(t)$ контролируется раз в 2 ч. Значение этой переменной, а также текущие значения переменных $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ подаются на УВМ (управляющую вычисли-

тельную машину), которая корректирует значения коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Из соображения простоты мы не приводим здесь рекуррентные алгоритмы адаптивной настройки параметров α . Таким образом, удалось учесть значение неконтролируемой переменной процесса $\lambda(t)$ по полученному выходу $q(t)$. Общий итог вышесказанного состоит в том, что при возникновении начальной стадии «запаривания» уменьшается суммарный сигнал (рис. 5) и загрузка также уменьшается.

В итоге длительной работы была создана система, способная решить поставленную проблему, а именно, избежать «запаривания» мельницы, а значит, и ее простоя. Важнейший показатель работы мельницы – это ее производительность. Отметим, что при нормальном режиме работы мельница производила до 25 т цемента в час. При введении в работу новой схемы управления процессом производительность выросла в среднем до 28 т, что является значительным результатом. Приведенный выше пример иллюстрирует случай применения системного анализа для конструирования компьютерной системы управления технологическим процессом, а итог системного анализа состоял в замене типовой схемы регулирования

процессом помола, представленной на рис. 4, разработанной схемой управления, показанной на рис. 5.

Нелишне заметить, что мы рассмотрели очень простой пример ликвидации проблемы «запаривании» мельницы сухого помола при производстве цемента. Тем не менее, создание системы регулирования, показанной на рис. 5, потребовало более 5 лет работы для группы исследователей.

Одним из «предшественников» системного анализа можно считать появившийся в первой половине прошлого столетия новый раздел теории оптимизации, получивший название «исследование операций». Важнейшим этапом в теории исследования операций является исходная постановка задачи. Это обстоятельство, по-видимому, тесно связано с вопросом «вытягивания» проблемы из реальности. Термин «исследование операций» впервые появляется в 1939 г., хотя истоки его видны еще в далеком прошлом. По мнению Р. Акофа [2], исследование операций «это – 1) применение научного метода; 2) комплексными научными коллективами; 3) для решения задач, связанных с управлением организованными (человеко-машинными) системами с целью получения решений, которые наилучшим образом отвечают целям всей организации». Первоначально основная задача исследования операций формулировалась в следующем виде [3]:

$$x = f(u, \mu),$$

где x – итоговое значение выходной переменной, характеризующей качество функционирования системы; u – переменные, которыми можно управлять; μ – переменные, которыми нельзя управлять, но значения их известны. Цель же состоит в том, чтобы при фиксированном μ найти такое управляющее воздействие u , при котором x достигает желаемого значения.

Обратим внимание на то, что в любой задаче (проблеме, проекте) исследования операций можно выделить следующие составные части: постановка задачи, построение модели, отыскание решения, его проверка на модели, а также внедрение решения и контроль его правильности. Следует иметь в виду, что формулировка задачи является едва ли не самым важным этапом для дальнейшего.

Важная особенность исследования операций [2] «заключается в том, что она а) характеризуется системным подходом, б) использованием комплексных научных коллективов и в) применением научного метода к задачам управления».

Некоторые фрагменты проблемы исследования операций могут быть сформулированы как отдельные оптимизационные задачи. Это удастся сделать в случае, когда они укладываются в доступную математическую формализацию. В целом этого, конечно же, не происходит, потому что, как было отмечено ранее, в этих процессах активно участвует человек и коллективы людей.

Ниже приведем краткий анализ работ по системному анализу и исследованию операций, проводимых на кафедре системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева.

Под руководством профессора И. В. Ковалева ведутся исследования в области моделирования мультиверсионных программных архитектур отказоустойчивых систем управления [5; 6]. Используются как аналитические методы, такие как вероятностно-временной GERT-сетевой анализ, марковские модели, так и имитационное моделирование на базе сред исполнения мультиверсионного программного обеспечения (ПО) [7; 8]. Результаты моделирования позволяют обеспечить эффективный выбор состава мультиверсионного ПО [9; 10]. Использование множества версий модулей программного обеспечения позволяет замаскировать ошибки отдельных мультиверсий. В зависимости от специфики разрабатываемого программного средства возможно применение той или иной мультиверсионной архитектуры ПО [11; 12]. Однако даже если будут должным образом использованы методы разнообразия проектирования ПО для уменьшения вероятности идентичных программных ошибок, все равно остается проблема определения эффективности подхода [13; 14]. Кроме того, остаются неучтенными возможные взаимодействия программных модулей в рамках всего программного средства [15], несмотря на то, что такие взаимодействия не предусмотрены проектом (свойство монолитности ПО, когда разбиение на модули существует лишь на стадии проектирования и написания кода) [16].

Профессор И. В. Ковалев со своими учениками продолжает работу в направлении совершенствования мультилингвистических технологий обработки информации, разработки новых моделей и алгоритмов формирования многоязычных терминологических словарей [11], являющихся основой информационно-терминологического базиса адаптивно-обучающих технологий. Результаты этой работы находят широкое применение при создании компьютерных информационно-управляющих систем различного назначения. Существенное значение в этом направлении имеет формирование распределенных архитектур телекоммуникационных систем на основе алгоритмов теории оптимизации [13]. Другим направлением является информационное обеспечение мультилингвистических адаптивно-обучающих технологий принятия решений в распределенных информационно-управляющих системах. Результаты этих исследований вошли в ряд монографий [5] и публикаций [6; 7].

Под руководством профессора Е. С. Семенкина и его школы сформировано научное направление по оптимизации сложных систем на основе методологии генетического программирования. В частности, это исследования по разработке самонастраивающихся адаптивных стохастических алгоритмов идентификации и оптимизации сложных систем и их применения в задачах автоматического проектирования интеллектуальных технологий анализа данных и моделирования сложных систем [17; 18]. С помощью разрабатываемых алгоритмов можно в автоматизированном режиме получать интеллектуальные информационные технологии классификации, аппроксимации, управления, прогнозирования, извлечения знаний из баз данных на основе нейросетевых, нечетких, нейронечет-

ких и эволюционных алгоритмов. Данный подход позволяет значительно расширить круг конечных пользователей интеллектуальных информационных технологий, повысить надежность решения задач анализа данных и обоснованность принятия решений при разработке соответствующих программных систем [19–21].

Результаты исследований в области анализа данных и управления широко применяются научной школой Е. С. Семенкина в прикладных областях: проектирование систем управления космическими аппаратами и орбитальными группировками, проектирование распределенных систем обработки информации и управления, проектирование распределенных многопроцессорных вычислительных систем, управление сложными технологическими процессами [21–23], мониторинг опасных объектов, моделирование глобальных экономических систем, управление инновациями и инвестициями реструктурируемых предприятий оборонно-промышленного комплекса, прогнозирование регионального экономического развития, разработка интеллектуальных систем защиты информации, прогнозирования, технической и медицинской диагностики, банковского скоринга и многие другие [24; 25].

Под руководством профессора А. Н. Антамошкина ведутся исследования по построению эффективных алгоритмов для решения дискретных обобщенных задачи Вебера. В частности, реанимирован метод изменяющихся вероятностей (МИВЕР), ранее предложенный для решения задач псевдоболевой оптимизации. МИВЕР рассматривается как специфический вариант генетического алгоритма, и его модификации позволяют решать задачи Вебера с высокой размерностью [4; 26].

Второе направление – это создание и использование логических алгоритмов классификации, основанных на выявлении закономерностей в исходных данных [27; 28]. Поиск закономерностей рассматривается как задача комбинаторной оптимизации, для решения которой строятся алгоритмы, использующие характерные свойства рассматриваемых задач.

По космической тематике ведутся исследования по автоматизации контроля и испытаний космических аппаратов. По экономике – моделирование инновационных процессов и организационных систем [29; 30].

На кафедре системного анализа и исследования операций выполняется цикл исследований, связанных с моделированием и управлением в условиях непараметрической неопределенности [31], а также развивается теория непараметрических систем при неполной информации об исследуемом процессе [32; 33]. Здесь большое внимание уделено задаче моделирования процессов дискретно-непрерывного типа. Предметом исследования являются как динамические, так и безынерционные системы с запаздыванием. Важным, с точки зрения практики направлением исследований является моделирование «трубчатых» процессов (Н-модели) [3; 33; 34], а также идентификация при разнотипной априорной информации (К-модели) [35; 36]. Интересным является направление исследований в области управления, связанных с «включением» обратного оператора на входе управляемого объекта (И-регулятор) [37]. В последние годы начаты иссле-

дования моделирования и управления активных систем в условиях неопределенности [35; 38; 39].

Следует отметить, что в приведенных выше направлениях исследований в области системного анализа в значительной степени преобладают методы, которые могут быть использованы при решении системных проблем и задач, и в меньшей мере уделяется внимание собственно «вытягиванию» проблемы из реальности. Последнее, конечно же, обусловлено трудностями, возникшими в настоящее время в экономике и промышленности.

Основное содержание настоящей статьи состоит в анализе проблематики, охватываемой термином «системный анализ». Специальный акцент делается на дискретно-непрерывные системы, подверженные воздействию различного рода случайных возмущений и неполной априорной информации об исследуемом объекте. Приводится общая схема управления активной системой. При этом обращается внимание на то, что элементы системы управления активной системой также являются активными. Достаточно подробно анализируется пример «вытягивания» проблемы из реальности на примере мельницы сухого помола, широко используемой в различных областях промышленности. Системный анализ этого процесса привел к устранению проблемы «запаривания».

Дан краткий обзор исследований в области системного анализа и исследований операций, проводимых на кафедре системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева.

Библиографические ссылки

1. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ. М. : Высшая школа, 1989. 361 с.
2. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. М. : Мир, 1971. 533 с.
3. Медведев А. В. Перспективные технологии XXI в. В 2 кн. Кн. 1 : монография / И. Ш. Абдуллин, Л. Н. Абуталипова, А. А. Азанова, А. В. Медведев [и др.]. Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2013. 162 с. : ил.
4. Antamoshkin A., Masich I. Pseudo-Boolean optimization in case of unconnected feasible sets. Models and Algorithms for Global Optimization. Springer Optimization and Its Applications. Vol. 4. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. XVI.
5. Ковалев И. В. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2007.
6. Ковалев И. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В. Мультилингвистическая технология сбора и обработки данных для подготовки и принятия решения в информационно-управляющих системах. М. : Макс-Пресс, 2009.
7. Карасева М. В., Ковалев И. В. Мультилингвистические технологии подготовки и принятия решений в распределенных информационно-управляющих системах. Красноярск : Изд-во КрасГАУ, 2010.

8. Карасева М. В., Ступина А. А. Программно-алгоритмическая поддержка мультилингвистической адаптивной обучающей технологии / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011.
9. Карасева М. В., Карцан И. Н., Зеленков П. В. Метапоисковая мультилингвистическая система // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 3(16). С. 69–70.
10. Зеленков П. В., Ковалев И. В., Карасева М. В., Рогов С. В. Мультилингвистическая модель распределенной системы на основе тезауруса // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 1(18). С. 26–28.
11. Ковалев И. В., Карасева М. В., Лесков В. О. Информационно-терминологический базис как совокупность лексически связанных компонентов // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 1(22). Ч. 1. С. 54–57.
12. Карасева М. В. Генерация ассоциативного поля лексически связанных терминологических компонентов // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 1(27). С. 77–79.
13. Ступина А. А., Югай А. Я., Карасева М. В. Алгоритмы оптимизации набора кредитных заявок // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2(35). С. 63–67.
14. Карасева М. В., Кустов Д. В. Информационно-терминологический базис в мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3(36). С. 29–31.
15. Модели и методы оптимизации сбора и обработки информации / Н. А. Распопин, М. В. Карасева, П. В. Зеленков, Е. В. Каюков, И. В. Ковалев // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2(42). С. 69–72.
16. Минимизация межмодульного интерфейса для обеспечения надежности мультиверсионного программного комплекса / И. В. Ковалев, Ю. А. Нургалеева, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, Ф. А. Лукин // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 35–37.
17. Семенкин Е. С., Семенкина М. Е. Применение генетического алгоритма с модифицированным оператором равномерной рекомбинации при автоматизированном формировании интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 3(16). С. 20–33.
18. Семенкин Е. С., Токмин К. А. Козволюционный подход для решения задач условной многокритериальной оптимизации технологии // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 4(21). С. 47–52.
19. Galushin P. V., Semenkin E. S. The asymptotic probabilistic genetic algorithm // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 5(26). С. 45–49.
20. Bukhtoyarov V. V., Semenkin E. S. A comprehensive evolutionary approach for neural network ensembles automatic design // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 7(33). С. 14–19.
21. Звонков В. Б., Семенкин Е. С. О решении сложных задач многокритериальной оптимизации модифицированными эвристическими стохастическими процедурами прямого поиска // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 5(31). С. 108–113.
22. Семенкин Е. С., Шабалов А. А., Ефимов С. Н. Автоматизированное проектирование коллективов интеллектуальных информационных технологий методом генетического программирования // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3(36). С. 77–82.
23. Бураков С. В., Семенкин Е. С. О решении вариационной задачи методом генетического программирования // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 5(38). С. 19–25.
24. Семенкин Е. С., Семенкина М. Е. Проектирование ансамблей интеллектуальных информационных технологий самоконфигурируемым алгоритмом генетического программирования // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4(44). С. 89–96.
25. Семенкина О. Е. Сравнение эффективности муравьиного и генетического алгоритмов при решении задач комбинаторной оптимизации // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4(44). С. 96–98.
26. Антамошкин А. Н., Кукарцев В. В., Бойко А. А. Математическая модель воспроизводства основных производственных фондов // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 4(17). С. 40–43.
27. Технология разработки бортового программного обеспечения: управление работами и объектами / А. Н. Антамошкин, О. С. Иноземцева, А. А. Колташев, С. А. Краус // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 1(18). С. 4–9.
28. Antamoshkin A. N., Stupina A. A. On classes of functions with binary variables // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 2(23). С. 47–49.
29. Антамошкин О. А., Нургалеева Ю. А., Усачев А. В. Модели модульной декомпозиции программного обеспечения технологических циклов управления // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 3(24). С. 66–69.
30. Антамошкин А. Н., Бакаева О. А. Сравнительный анализ «первых» критериев выявления связи между качественными переменными // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4(37). С. 4–8.
31. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Общий подход // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 3(20). С. 65–69.
32. Шестернева О. В., Мальцева Т. В. Метод построения математической модели линейного динамического объекта // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 2(23). С. 4–8.
33. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3(29). С. 4–9.
34. Первушин В. Ф., Сергеева Н. А., Стрельников А. В. Прецизионный генератор случайных чисел // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 5(31). С. 86–91.
35. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Активные процессы – I // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4(37). С. 52–58.
36. Агафонов Е. Д., Мангалова Е. С. Об одном алгоритме классификации с использованием коллективов непараметрических моделей // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2(42). С. 4–8.
37. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление-I // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 52–57.
38. Иконников О. А., Первушин В. Ф. Исследование непараметрических моделей динамических систем // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 36–41.
39. Мальцева Т. В., Медведев А. В. О компьютерном исследовании К-моделей // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 52–57.

References

1. Tarasenko F. P. *Vvedenie v sistemnyy analiz* (Introduction to systems analysis). Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 361 p.
2. Akof R. *Osnovi issledovaniya operatsii* (Basics of operations research). Moscow, Mir, 1971, 533 p.
3. *Perspektivnye tehnologii XXI veka* (Promising technologies of the 21 XXI century), monografia. Odessa, KUPRIENKO SV, 2013, 162 p.
4. Antamoshkin A., Masich I. Pseudo-Boolean optimization in case of unconnected feasible sets. Models and Algorithms for Global Optimization. *Springer Optimization and Its Applications*, vol. 4, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007, XVI.
5. Kovalev I. V. *Metodologiya ocenki i povichenia nadegnosti programmno-informacionnih tehnologii i struktur* (Methodology for evaluating and improving the reliability of software and information technology and structures). Krasnoyarsk, ITC KGTU, 2007.
6. Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Brezitsky V. V. *Multilingvisticheskaya tehnologiya sbora i obrabotki danih dlya podgotovki i prinyatiya resheniya v informatsionno-upravlyayuschiy sistemah* (Of multilingual technology of collecting and processing data for the preparation and decision in management information systems). Moscow, Maks-Press, 2009.
7. Karaseva M. V., Kovalev I. V. *Multilingvisticheskie tehnologii podgotovki i prinyatiya resheniy v raspredelennykh informatsionno-upravlyayuschiy sistemah* (Of multilingual technology of preparation and decision making in distributed information and control systems). Krasnoyarsk, Izdatelstvo KrasGAU, 2010.
8. Karaseva M. V., Stupina A. A. *Programmno-algoritmicheskaya podderzhka multilingvisticheskoy adaptivnoy obuchayushey tehnologii* (Program-algorithmic support of multilingual adaptive learning technology). Krasnoyarsk, SibGAU, 2011.
9. Karaseva M. V., Kartsan I. N., Selenkov P. V. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 3(16), p. 69–70.
10. Selenkov P. V., Kovalev I. V., Karaseva M. V., Rogov S. V. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 1(18), p. 26–28.
11. Kovalev I. V., Karaseva M. V., Leskov V. O. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 1(22), p. 54–57.
12. Karaseva M. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 1(27), p. 77–79.
13. Stupina A. A., Yugay A. Yu., Karaseva M. V. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 2(35), p. 63–67.
14. Karaseva M. V., Kustov D. V. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3(36), p. 29–31.
15. Raspopin N. A., Karasyova M. V., Zelenkov P. V., Kayukov E. V., Kovalyov I. V. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 2(42), p. 69–72.
16. Kovalev I. V., Nurgaleeva J. A., Shahmatov A. V., Chekmaryov S. A., Lukin F. A. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2(48), p. 35–37.
17. Seminkin E. S., Semenkina M. E. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 3(16), p. 27–32.
18. Seminkin E. S., Tokmin K. A. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 4(21), p. 47–52.
19. Galushin P. V., Seminkin E. S. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 5(26), p. 43–49.
20. Bukhtoyarov V. V., Seminkin E. S. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 7(33), p. 14–19.
21. Zvonkov V. B., Seminkin E. S. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 5(31), p. 108–113.
22. Seminkin E. S., Shabalov A. A., Efimov S. N. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3(36), p. 77–82.
23. Burakov S. V., Seminkin E. S. *Vestnik SibGAY*, 2011, № 5(38), p. 19–25.
24. Seminkin E. S., Semenkina M. E. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 4(44), p. 89–96.
25. Semenkina O. E. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 4(44), p. 96–98.
26. Antamoshkin A. N., Kukartsev V. V., Boyko A. A. *Vestnik SibGAY*, 2007, № 4(17), p. 40–943.
27. Antamoshkin A. N., Inozemtseva O. S., Koltashev A. A., Kraus S. A. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 1(18), p. 4–9.
28. Antamoshkin A. N., Stupina A. A. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 2(23), p. 47–49.
29. Antamoshkin O. A., Nurgaleeva Ju. A., Usachev A. V. *Vestnik SibGAY*, 2009, № 3(24), p. 66–69.
30. Antamoshkin A. N., Bakaeva O. A. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 4(37), p. 4–8.
31. Medvedev A. V. Медведев А. В. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 3(20), p. 65–69.
32. Shesterneva O. V., Maltseva T. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 2(23), p. 4–8.
33. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 3(29), p. 4–9.
34. Pervushin V. F., Sergeeva N. A., Strelnikov A. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 5(31), p. 86–91.
35. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 4(37), p. 52–58.
36. Agafonov E. D., Mangalova E. S. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 2(42), p. 4–8.
37. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2(48), 57–63 p.
38. Ikonnikov O. A., Pervushin V. F. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 1(47), p. 36–41.
39. Maltseva T. V., Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2(48), p. 52–57.

© Медведев А. В., 2013

УДК 519.872

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ С АЛЬТЕРНАТИВНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ РЕШЕНИЙ*

И. А. Панфилов, Е. П. Базанова, Е. А. Сопов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: crook_80@mail.ru, bazanova_ekaterina@mail.ru

Описывается исследование различных вариантов представления решений в генетическом алгоритме. Помимо традиционных бинарного кодирования и кода Грея, используемых для представления вещественных переменных, в исследовании рассмотрены: гамма- и дельта-коды Элиаса, гамма-коды Левенштейна, коды Голomba, коды Райса и другие. Для апробации данных представлений использовался модифицированный генетический алгоритм с переменной длиной строк. Проводится статистическая значимость данных параметров для работы алгоритма. Приводятся результаты численных исследований на представительном множестве тестовых задач. Показана целесообразность использования некоторых альтернативных видов кодирования для отдельных задач.

Ключевые слова: генетический алгоритм, бинарное кодирование, оптимизация.

INVESTIGATION OF THE GENETIC ALGORITHM WITH AN ALTERNATIVE REPRESENTATION OF SOLUTIONS

I. A. Panfilov, E. P. Bazanova, E. A. Sopov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: crook_80@mail.ru, bazanova_ekaterina@mail.ru

This paper describes the reaserch of the various options of representation of solutions in the genetic algorithm. Besides traditional binary coding and Gray code used to represent the real variables, Elias Gamma-codes and Delta-codes, Levenstein Gamma-codes, Golomb codes, Rice codes and others are examined. To test the data representations, a modified genetic algorithm with variable-length strings is used. This paper deals with the statistical significance of these parameters for the algorithm. The results of numerical studies are presented. The expediency of the use of some alternative coding for the individual tasks is shown.

Keywords: genetic algorithm, binary coding, optimization.

Огромное число работ посвящено исследованию генетических алгоритмов. Традиционно исследователи рассматривают влияние вероятности мутации, размера популяции, способов селекции и др., легко настраиваемые параметры алгоритма. Представление решений же, как правило, осуществляется кодированием в бинарную строку вещественных переменных с помощью традиционного бинарного кодирования или грей-кода. Целью данной работы было исследовать возможность применения в генетическом алгоритме альтернативных способов бинарного кодирования вещественных чисел.

При проектировании генетического алгоритма выбор способа представления решений является определяющим. В зависимости от решаемой задачи составляют хромосомы решений из вещественных чисел,

целых чисел, специальные алфавиты, используют порядковое представление, представление в виде «деревьев» и др. Стандартный генетический алгоритм использует в качестве хромосомы бинарный вектор.

Представление хромосом определяется способом кодирования. Как правило, в генетическом алгоритме применяется двоичное представление хромосом. Оно основано на известном способе записи десятичных чисел в двоичной системе, где каждый бит двоичного кода соответствует очередной степени цифры 2. Например, двоичная последовательность [10011] представляет собой код числа 19, поскольку $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 19$. Данный способ кодирования решений будем называть *прямым бинарным кодом*. Существует много способов бинарного кодирования решений, рассмотрим некоторые из них.

* Данное исследование проводится при поддержке гранта Президента РФ молодым кандидатам наук на 2012–2013 гг. (МК-2835.2012.9).

Код Грея – это бинарный код целого числа, такой, что для смежных целых чисел расстояние между их кодами в метрике Хемминга равно 1.

Стандартное рефлексивное грей-кодирование целого числа получается применением оператора исключающего ИЛИ, к стандартному бинарному кодированию целого числа и к тому же бинарному коду, смещенному на одну позицию вправо, последний бит отсекается.

Для многих практических задач код Грея оказывается более эффективным, чем бинарное кодирование [1]. Код Грея частично сохраняет структуру окрестностей пространства поиска в бинаризованном пространстве. В результате, грей-код не может образовывать оптимумов больше, чем у исходной целевой функции. Более того, так как у текущей точки в коде Грея соседних точек больше, чем в дискретной целевой функции, то в пространстве поиска грей-кода число оптимумов обычно меньше. В противоположность, прямой бинарный код часто создает новые оптимумы, которых у исходной целевой функции не было [2].

Практически не встречается в научной литературе использование для генетического алгоритма бинарных кодов с переменной длиной. Значение цифры начинается со старшей ненулевой цифры, например, в числе $000001101_2 = 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 + \dots = 13$ – это последние 4 цифры. Порядок числа определяется позицией старшей ненулевой цифры в записи числа. Как и при обычной записи в десятичной системе, он равен числу цифр в записи числа без предшествующих незначащих нулей. В данном примере порядок равен четырем. Методы этой группы являются трансформирующими и поточечными (т. е. могут применяться даже в том случае, когда длина блока с данными не задана).

Унарный код – это запись числа N , последовательность из N нулевых бит и одного единичного.

Гамма-коды Элиаса (*Elias γ -codes*). Данные коды формируются в зависимости от диапазона числа. Допустим, кодируется число n , тогда гамма-кодом Элиаса для числа n будет его обыкновенное бинарное представление без старшей единицы, дополненное слева унарным представлением числа (табл. 1).

Таблица 1

Гамма-коды Элиаса

Диапазон	Гамма-коды Элиаса*	Длина кода, бит
1	1	1
2...3	01x	3
4...7	001xx	5
8...15	0001xxx	7
16...31	00001xxxx	9
32...63	000001xxxxx	11

* Символами «х» обозначены биты мантииссы без старшей единицы.

Дельта-коды Элиаса (*Elias δ -codes*). Дельта-кодами Элиаса называются гамма-коды, в которых унарная часть также закодирована гамма-кодами. То

есть для получения дельта-кода нужно закодировать L (количество значащих битов в двоичном представлении числа n) с помощью гамма-кода Элиаса и дописать двоичное представление числа без старшей единицы (табл. 2).

Таблица 2

Дельта-коды Элиаса

Диапазон	Дельта-коды Элиаса*	Длина кода, бит
1	1	1
2...3	010x	4
4...7	011xx	5
8...15	00100xxx	8
16...31	00101xxxx	9
32...63	00110xxxxx	10

Единственное отличие между γ - и δ -кодами состоит в том, что в γ -кодах экспоненты записываются в унарном виде, а в δ -кодах к ним еще раз применяется γ -кодирование. Видно, что γ -коды первых 15 чисел короче δ -кодов, а γ -коды первых 31 числа не длиннее δ -кодов. То есть чем неравномернее распределение вероятностей, чем круче возрастает вероятность чисел при приближении их значения к нулю, тем выгоднее γ – коды по сравнению с δ -кодами [3].

Гамма-коды Левенштейна (*Levenstein γ -codes*). Данный код для числа n получается путем обращения последовательности битов в двоичной записи этого числа и добавления перед каждым битом, кроме последнего, флагового (flag bit) бита 0. Последним флаговым битом является бит 1, который совпадает с самым старшим битом в исходной двоичной записи числа n (табл. 3).

Таблица 3

Гамма-коды Левенштейна

n	Гамма-коды Левенштейна
1	1
5	01001
13	0100011
63	01010101011
129	01000000000001

Коды Голомба (*Golomb codes*). Код Голомба для n с заданным параметром m , дает соединение двух кодов: унарная запись числа $q = n/m$ и кодированный остаток r от деления n/m :

Если m является степенью числа 2, то код остатка представляет собой двоичную запись числа r , размещенную в $\log_2 m$ битах;

Если m не является степенью 2, вычисляется число $b = \log_2 m$.

Если $r < 2^b - m$, код остатка представляет собой двоичную запись числа r , размещенную в $b-1$ битах, иначе остаток r кодируется двоичной записью числа $r < 2^b - m$, размещенной в b битах (табл. 4).

Коды Райса (*Rice codes*). Код Райса для n с заданным параметром k дает соединение двух кодов: унарная запись числа $q = n/2^k$ и кодированный остаток r от деления $n/2^k$, представляющий собой двоичную запись числа r , размещенную в k битах (табл. 5).

Коды Голомба

<i>n/m</i>	1	2	3	4	5
0	0	00	00	000	000
1	10	01	010	001	001
2	110	100	011	010	010
3	1110	101	100	011	0110

Таблица 4

Коды Райса

<i>n/m</i>	1	2	3	4	5
0	0	000	0000	00000	000000
1	10	001	0001	00001	000001
2	110	010	0010	00010	000010
3	1110	011	0011	00011	000011

Таблица 5

Стандартный генетический алгоритм работает с бинарными хромосомами с фиксированной длиной. В данной работе использовался модифицированный генетический алгоритм, в котором были реализованы операторы процентного скрещивания для хромосом с переменной длиной [4].

Исследование эффективности генетического алгоритма проводилось на задаче минимизации следующих тестовых функций: функция Розенброка, функция Шекеля, функция Растригина, функция Катникова, функция Гриванка, функция Де Йонга. Количество независимых переменных изменялось от 2 до 4. Длина каждой переменной для генетического алгоритма с прямым бинарным и грей-кодированием была взята

равной 10. Для генетического алгоритма с кодированием гамма- и дельта-кодами Элиаса, гамма-кодами Левенштейна, кодами Голомба и Райса длина каждой переменной из меняется от 1 до 15. Статистика набралась по 100 запускам алгоритма. Размер популяции – 50 индивидов. Число поколений – 50. Для оценки эффективности алгоритмов использовалась надежность. Надежность – процент успешных запусков (решение найдено) алгоритма от общего числа запусков. Результаты решения тестовых задач приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что наилучший результат показал алгоритм с кодированием решений с помощью кода Райса. Генетический алгоритм с прямым бинарным кодированием хорошо работает на простых задачах, когда допустимая область обладает удобными для оптимизации свойствами (большой размер, выпуклая и т. д.). Однако из полученных результатов можно сделать вывод, что для сложных задач безусловной оптимизации генетический алгоритм с кодом Райса дает более высокую эффективность.

Для оценки статистической значимости полученных результатов использовался критерий ANOVA. Критерий ANOVA представляет собой непараметрическую оценку Манна–Уитни при значимости $\alpha = 0,05$. Сравнения проводились попарно для каждого алгоритма со всеми остальными, представленными в табл. 6. Метод ANOVA позволил определить, что различия результатов сравнения алгоритмов статистически достоверны.

Таблица 6

Результаты решения тестовых задач

Функция Растригина						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	25	67	50	17	17	84
Функция Гриванка						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	25	75	50	17	17	84
Функция Катникова						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	75	84	67	17	84	100
Функция Шекеля						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	50	75	67	20	84	100
Функция Де Йонга						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	75	75	100	100	67	100
Функция Розенброка						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	59	84	50	34	50	84
Функция «Сомбреро»						
Способ кодирования	Прямой бинарный код	Код Грея	Гамма-коды Элиаса	Дельта-коды Элиаса	Гамма-коды Левенштейна	Коды Райса
Надежность	75	84	50	17	50	100

Таким образом, показана эффективность использования в генетическом алгоритме для решения задач оптимизации не только хорошо известных методов бинарного кодирования (прямой метод и грей-код), но и альтернативных способов. Особый интерес альтернативные способы кодирования представляют для гибридных генетических алгоритмов с локальным спуском. В данный момент проводятся исследования таких алгоритмов.

Библиографические ссылки

1. Caruana R., Schaffer J., Representation and Hidden Bias: Gray vs. Binary Coding for Genetic Algorithms. Proc. 5th International Conference of Machine Learning, 1988.
2. Whitley L. D. A Free Lunch Proof for Gray versus Binary Encoding. Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conference, 1999.
3. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство Архиваторов, сжатие изображений и видео. М. : Диалог – МИФИ, 2003. 384 с.

4. Ефимов С. Н., Панфилов И. А. Разработка метода выбора структуры многопроцессорных вычислительных систем // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 1(8). С. 22–26.

References

1. Caruana R., Schaffer J., Representation and Hidden Bias: Gray vs. Binary Coding for Genetic Algorithms. – Proc. 5th International Conference of Machine Learning, 1988.
2. Whitley L.D. A Free Lunch Proof for Gray versus Binary Encoding. Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conference, 1999.
3. Vatolin D., Ratushnjak A., Smirnov M., Jukin V. *Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo Arkhivatorov, szhatiye izobrazheniy i video* (Data compression methods. The device archiver, compress images and videos). Moscow, DIALOG – MIFI, 2003, 384 p.
4. Efimov S. N., Panfilov I. A. *Vestnik SibGAU*. 2006, no. 1(8), p. 22–26.

© Панфилов И. А., Базанова Е. П.,
Сопов Е. А. 2013

УДК 004.021

МОДУЛЯРНЫЕ ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

В. С. Ростовцев, Е. И. Зорин, Е. А. Грачёв

Вятский государственный университет
Российская Федерация, 610000, Киров, ул. Московская, 36. E-mail: rostov_kirov@mail.ru

Моделируются высокоточные параллельные вычисления с повышенной разрядностью, основанные на модулярной арифметике с преобразованием чисел из позиционной системы счисления в систему остаточных классов и обратно с помощью нейронных сетей. Применение нейронных технологий позволяет распараллелить вычисления на уровне алгоритма решения задачи, а применение модулярной арифметики дает возможность повысить быстродействие высокоточных вычислений за счёт перехода к обработке малоразрядных данных и применения параллельной обработки на уровне выполнения элементарных арифметических операций. Построены нейронные сети для перевода из позиционной системы счисления в систему остаточных классов и обратно. Получены зависимости времени перевода от изменения разрядности. Получены зависимости времени выполнения операций сложения, вычитания и умножения для чисел с фиксированной запятой от изменения разрядности.

Ключевые слова: нейросетевые технологии, система остаточных классов, высокоточные вычисления, параллельные вычисления.

RESIDUAL HIGH-PRECISION PARALLEL COMPUTING WITH USING OF NEURAL NETWORKS

V. S. Rostovtcev, E. I. Zorin, E. A. Grachev

Vyatskiy State University
36, Moskovskaya str., Kirov, 610000, Russian Federation. E-mail: rostov_kirov@mail.ru

* Работа выполнена в рамках гранта по реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации. Соглашение № 14.B37.21.0590.

The authors present the modeling high-precision parallel computing with high-bit data, based on the residue number systems with the conversion of numbers from the positional notation to the residual notation and back with the using of neural networks. Application of neural technology allows parallelize computations at the level of the algorithm, and the use of residue number systems makes it possible to improve the performance of high-precision computation through the transition to a low-bit data processing and application of parallel processing at the level of the elementary arithmetic operations. A neural network for the conversion of the positional notation to the residual notation and back is constructed. The dependence of the time of conversion from changing the bit has been got. The dependence of the time operations of addition, subtraction and multiplication for fixed-point numbers from changing the bit has been got.

Keywords: neural network technology, residue number systems, high-performance computing, parallel computing.

С ростом производительности современных ЭВМ расширяется спектр и размерность решаемых на ЭВМ задач, повышаются требования к точности компьютерных вычислений. Большинство компьютерных вычислений проводятся в арифметике с плавающей точкой с жестко ограниченной длиной мантииссы, что приводит к появлению неустраняемых ошибок округления. В настоящее время существует множество библиотек, поддерживающих высокоточные вычисления ZREAL (Россия), MPARITH (Германия), GMP (США) и др., применение которых сдерживается сильной зависимостью роста времени выполнения арифметических операций от точности вычислений.

Одним из способов решения данной проблемы является использование модулярной арифметики [1], которая обеспечивает вычисление задач большой алгоритмической сложности. Модулярной системе счисления присущи возможность глубокого распараллеливания вычислений и отсутствие обмена данными в процессе вычислений [2]. При аппаратной реализации этих операций на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) обеспечивается параллельное выполнение операций над элементами векторов [3]. В отличие от позиционной системы счисления ошибка в одной позиции вектора не влияет на расчеты в других позициях вектора. Этот факт позволяет проектировать устройства с повышенной отказоустойчивостью и с коррекцией ошибок [2; 3].

В модулярной арифметике успешно применяются нейронные сети (НС) [2–8]. Разные модели нейросетевых алгоритмов различаются по требованиям к ресурсам системы. Наряду с универсальными моделями НС были исследованы несколько модификаций специальных нейросетевых алгоритмов, разработанных для выполнения преобразования чисел из позиционной системы счисления (ПСС) в систему остаточных классов (СОК). Нейронная сеть конечного кольца (НСКК) представляет специализированный механизм преобразования чисел из ПСС в СОК и обратно [4–6]. Применение НСКК обеспечивает преобразования из одной системы счисления в другую быстрее классических методов и отличается меньшим количеством узлов сети и простотой их организации [4–8]. Например, при использовании НСКК прямого распространения с модульными операциями в каждой ступени для преобразования числа $A = 253$ по модулю 5 понадобилось 6 операций: три операции сложения и три операции сокращения по модулю.

Структурная схема НСКК подробно рассмотрена в [5] и включает входной слой, скрытые слои и выход-

ной слой. В работе исследовались высокоточные вычисления с числами большой разрядности. Поэтому при разработке алгоритма перевода чисел из ПСС в СОК были выбраны различные основания системы счисления – система счисления с основанием 2 и с основанием 2^{32} .

По результатам моделирования НСКК продемонстрировали лучшие показатели по сравнению с универсальными НС как по скорости и точности выполнения операции преобразования чисел из ПСС в СОК, так и по требуемым для его реализации ресурсам. Специализированные алгоритмы преобразования чисел из ПСС в СОК являются эффективным решением проблемы обеспечения высокоточных вычислений, особенно при их аппаратной реализации [3].

Архитектура НСКК прямого распространения с модульной операцией только на финишной ступени является эффективнее по затратам оборудования и ресурсов по сравнению с НСКК прямого распространения с модульными операциями в каждой ступени. Нейроны скрытого слоя представляют собой обычные сумматоры и не требуют реализации операций сокращения по модулю.

Основной акцент в работе был сделан на обеспечение высокоточных вычислений за счёт повышения разрядности обрабатываемых чисел, что потребовало увеличения значения основания системы счисления, которое ведёт к уменьшению размера массива весов и объёма используемой памяти. Для перевода из системы остаточных классов в позиционную систему счисления используется также нейронная сеть [2].

Для реализации выбранного алгоритма преобразования чисел из ПСС в СОК и обратно был выбран язык программирования C++, так как основная программа предназначена для работы на высокопроизводительном кластере с использованием технологии MPI [8] со следующими характеристиками:

- пиковая производительность системы – 19 TFlops;
- количество вычислительных узлов – 288;
- количество вычислительных ядер – 2304;
- каждый узел содержит 4-ядерные процессоры Quad-CoreIntelXeon® 5345 EM64T (тактовая частота 2,33 ГГц, процессорный КЭШ – 8 Мб, оперативная память – 2 GB).

Экспериментальные вычисления проводились на одном вычислительном узле кластера. Реализация распараллеливания программы выполнена с помощью библиотеки MPICH2. Для реализации НСКК при переводе из ПСС в СОК использовалась библиотека

GMP и компилятор фирмы Intel. Для экспериментального моделирования разработан комплекс программ высокоточных вычислений в системе остаточных классов. Используются числа в формате с фиксированной запятой с изменяемой разрядностью данных (в пределах от 64 до 2048 бит с шагом 64) и изменяемой размерностью массива обрабатываемых данных (в пределах от 10^4 до 10^9), который осуществляет операции сложения, вычитания и умножения [8].

Разрядность преобразуемых и обрабатываемых данных задавалась пользователем как аргумент программы в пределах от 64 до 2048 с шагом 64. Основаниями СОК выбраны самые большие 31-разрядные простые числа, так как вычисления с большими основаниями происходят быстрее, но необходимо учитывать возможность переполнения стандартного диапазона процессора (64 бита).

В первой серии экспериментов использовался формат чисел с фиксированной точкой, количество кото-

рых составляло 1000. Количество оснований определялось разрядностью данных. Так, например, для 64-битных данных было использовано 5 оснований, для 2048-битных – 133 основания. Затраты времени для перевода из ПСС в СОК, представленные на рис. 1, показывают выигрыш в 3 раза по сравнению с классическими методами только на повышенной разрядности чисел (более 62048) и увеличении размера основания до 2^{32} .

На рис. 2 приведен график зависимости времени перевода чисел из СОК в ПСС с использованием НСКК с $K = 2^{32}$ и $K = 2^{64}$. Общее количество переводимых данных составляет 1000. Разрядность изменяется от 2048 бит до 65536 бит с шагом 2048 бит. Результаты экспериментов показывают, что затраты времени преобразования чисел из СОК в ПСС соответствуют затратам времени при использовании классических методов.

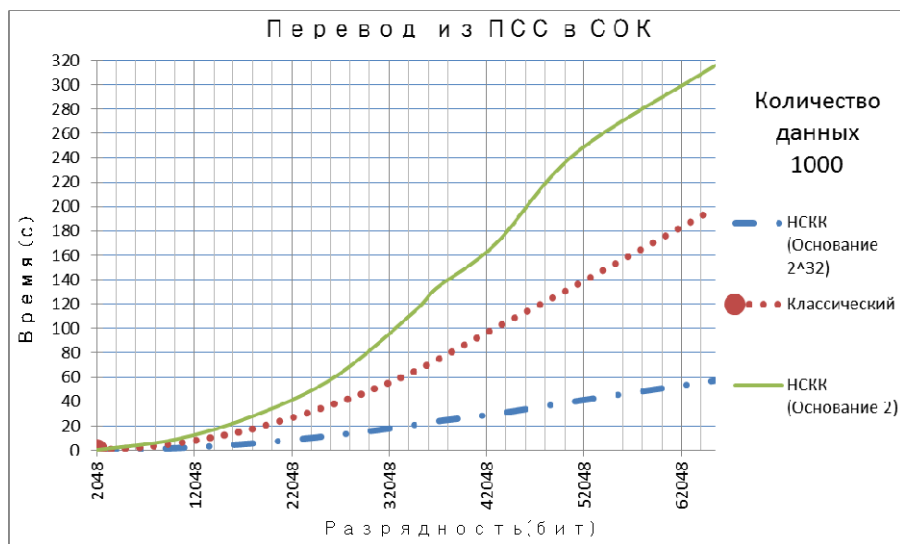


Рис. 1. График зависимости перевода чисел из ПСС в СОК

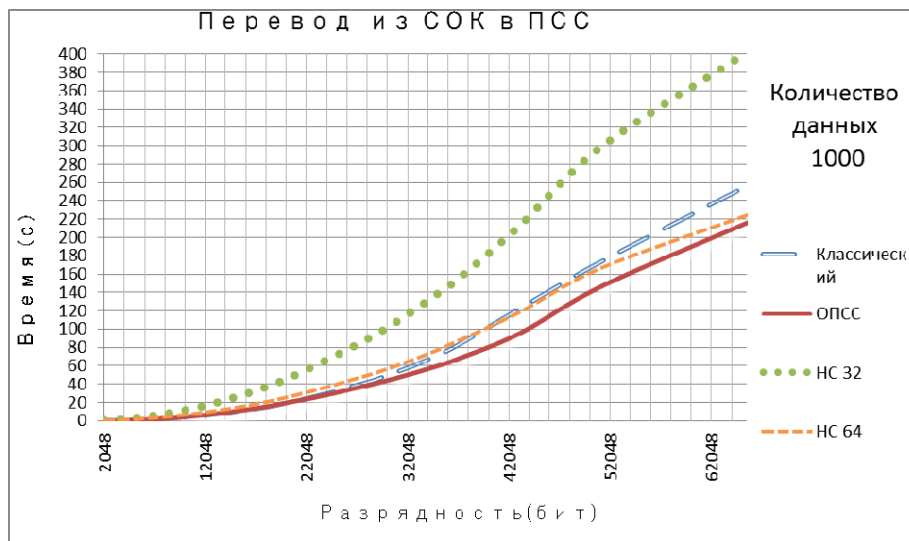


Рис. 2. График зависимости перевода чисел из СОК в ПСС

Эксперименты демонстрируют [8], что время перевода чисел из ПСС в СОК и обратно из СОК в ПСС зависит от разрядности и объема входных данных (рис. 1, 2).

Выигрыш по быстродействию в формате с плавающей точкой наблюдается только при использовании чисел повышенной разрядности (более 2048 разрядов). В экспериментах разрядность изменялась от 2048 бит до 65536 бит с шагом 2048 бит.

Таким образом, для обеспечения высокоточных вычислений целесообразно повысить разрядность обрабатываемых данных, использовать перевод чисел в систему остаточных классов и произвести распараллеливание задач, при аппаратной реализации использовать ПЛИС.

При использовании нейросетевых технологий перевод чисел из ПСС в СОК и обратно необходимо производить с помощью нейронной сети конечного кольца, которые не требуют специальной библиотеки для работы с длинными числами в отличие от классических методов перевода чисел.

Время выполнения операций сложения, вычитания и умножения для чисел с фиксированной запятой в системе остаточных классов значительно меньше, чем время выполнения аналогичных операций, вычисленных в позиционной системе счисления с использованием библиотеки GMP. Сложение и вычитание чисел в СОК выполняется быстрее примерно на 30 %, чем в ПСС, а умножение в СОК в несколько раз быстрее, чем в ПСС. Применение чисел с плавающей запятой дает эффект только при повышенной разрядности чисел.

Библиографические ссылки

1. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах. М. : Советское радио, 1968.
2. Червяков Н. И. Методы и принципы построения модулярных нейрокомпьютеров // 50 лет модулярной арифметике : тр. Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. (23–25 ноября 2005, Москва, Зеленоград). Зеленоград : Изд-во МИЭТ, 2006.
3. Евдокимов А. А. Реализация модулярных нейронных вычислительных структур на базе ПЛИС // 50 лет модулярной арифметике : тр. Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. (23–25 ноября 2005, Москва, Зеленоград). Зеленоград : Изд-во МИЭТ, 2006.
4. Червяков Н. И., Сивоплясов Д. В. Нейронная сеть конечного кольца прямого распространения с модульной операцией на финишной ступени // Вестник СевКавГТУ. Сер. «Физико-химическая». 2004. № 1 (8). С. 159–161.
5. Пат. РФ № RU 2279132 C2 Нейронная сеть конечного кольца / Н. И. Червяков, В. А. Галкина, Ю. А. Стрекалов, С. В. Лавриненко. Опубл. 27.06.2006.

6. Пат. РФ № RU 2317584 C1 Конвейерная нейронная сеть конечного кольца / Н. И. Червяков. Опубл. 20.02.2008.

7. Сахнюк П. А., Шапошников А. В. Оптимизация структуры нейронных сетей конечного кольца // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2001. № 10. С. 13–18.

8. А. с. о регистрации программы для ЭВМ № 2013613857. Программный комплекс моделирования модулярных вычислений на базе нейронной сети конечного кольца. / В. С. Ростовцев, Е. А. Грачев, Е. И. Зорин. № 20136611269 ; заявл. 27.02.2013 ; опубл. 17.04.2013.

References

1. Akushsky I. Ya., Yuditsky D. I. *Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh* (Mashinnaya arithmetics in residual classes). Moscow, Soviet radio, 1968.
2. Chervyakov N. I. [Metody's worms and principles of creation of modular neurocomputers]. *50 let modulyarnoy arifmetike. Trudy Yubileynoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [50 years to modular arithmetics. Works Anniversary International scientific and technical conference]. Moscow, Zelenograd, November 23–25, 2005. Zelenograd, MI-ET publishing house, 2006. (In Russ.)
3. Evdokimov A. A. [Realization of modular neural computing structures on the COTTON VELVET]. *50 let modulyarnoy arifmetike. Trudy Yubileynoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [50 years to modular arithmetics. Works Anniversary International scientific and technical conference]. Moscow, Zelenograd, November 23–25, 2005. Zelenograd, MI-ET publishing house, 2006. (In Russ.)
4. Chervyakov N. I., Sivoplyasov D. V. *Vestnik SevKavGTU. Seriya "Fiziko-khimicheskaya"*. 2004, № 1 (8), p. 159–161.
5. Chervyakov N. I., V. A. Galkin, Y. A. Strekalov, Lavrinenko S. V. *Neyronnaya set' konechnogo kol'tsa* [Neural network of a final ring]. Patent RF, no. RU 2279132 C2, 2006.
6. Chervyakov N. I. *Konveyernaya neyronnaya set' konechnogo kol'tsa* [Conveyor neural network of a final ring]. Patent RF, no. RU 2317584 C1, 2008.
7. Sakhanyuk P. A., Shaposhnikov A. V. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye*. 2001, № 10, p. 13–18.
8. Rostovtcev V. S., Grachev E. A. Zorin E. I. *Programmnyy kompleks modelirovaniya modulyarnykh vychisleniy na baze neyronnoy seti konechnogo kol'tsa* [Program complex of modeling of modular calculations on the basis of a neural network of a final ring]. Certificate on the state registration of the computer program no. 2013613857 of 17.04.2013 (Demand no. 20136611269 of 27.02.2013).

© Ростовцев В. С., Зорин Е. И.,
Грачев Е. А., 2013

ПОСТРОЕНИЕ И АДАПТАЦИЯ NEWSQL СУБД В ЧАСТНОМ «ОБЛАКЕ»

А. С. Соболев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
 Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
 E-mail: alexander.so8ol@gmail.com

Анализируются вопросы построения NewSQL СУБД в частном «облаке» с учетом ограничений БД. Формализуются требования к будущей NewSQL СУБД, в которой планируется обслуживать систему электронного документооборота (СЭД) и систему бизнес-аналитики предприятия. Разрабатываются методики по использованию NewSQL систем в частном «облаке» для достижения наилучшей производительности при сохранении требований ACID (атомарность, согласованность, изолированность, надёжность). Приводятся результаты сравнения NewSQL СУБД в задачах обеспечения доступа и скорости обработки запросов на основании разработанных методик. Для выбранной СУБД определяется наилучший вариант её построения. Показано, что СУБД, отвечающей требованиям, является VoltDB. По сравнению с традиционными решениями, VoltDB превосходит их в производительности более чем в 2 раза. После применения разработанных методик производительность СУБД возросла на 14 %. Важно отметить, что представленное решение полностью удовлетворяет критериям, предъявляемым к частному «облаку».

Ключевые слова: СУБД, NewSQL, «облачные» вычисления, большие данные, СЭД.

DESIGN & ADAPTATION NEWSQL DBMS IN THE PRIVATE “CLOUD”

A. S. Sobol

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation.
 E-mail: alexander.so8ol@gmail.com

The paper dwells on the issues of building NewSQL database in a private “cloud”, subject to the limitations database. It reviews formalized requirements for a future NewSQL database, which will serve EDMS (electronic document management system) and a system of business intelligence of a company. There are developed methods for using NewSQL systems in a private “cloud” to achieve the best performance at preservation of the requirements of ACID (atomicity, consistency, isolation, durability). The results of comparing NewSQL database in problems of access and query processing based on the developed techniques are presented. The best version of the selected DBMS building is defined. It is shown that the database meets the requirements of a VoltDB. The VoltDB exceeds the performance more than 2 times compared with traditional solutions. The performance solution has increased by 14 % after application of the developed techniques. It is important to note that the presented solution fully meets the criteria for a private “cloud”.

Keywords: DBMS, NewSQL, Cloud computing, Big Data, EDMS.

Учитывая сохраняющуюся тенденцию роста объемов данных в OLTP-системах (Online Transaction Processing), требуется новое поколение решений, чтобы удовлетворить потребности потребителей. Существующие решения при этом, такие как реляционные БД, не имеют достаточного уровня производительности либо же обладают плохим горизонтальным масштабированием, а NoSQL-системы не удовлетворяют требованиям ACID, жизненно важным для СЭД и других систем, традиционно базирующихся на реляционных БД. При этом в отличие от NoSQL-систем, эта СУБД должна поддерживать приложения, уже написанные для предыдущих поколений СУБД. Таким образом, разговор о радикальных изменениях интерфейса, отказе от SQL или значительных изменениях в схеме данных и быть не может [1]. Дополнительным условием являются архитектурные особенности СЭД:

- B-Tree-индексирование;
- наличие в БД СЭД мигрирующих строк: строка за время своего существования в базе данных увеличивается и перемещается из исходной страницы в другую;
- «дерево» индексов, имеющее более 7 уровней;
- большая кардинальность таблиц: среднее значение ~26;
- фактор селективности таблиц, равный 0,038;
- присутствие таблиц маленького размера;
- интенсивные обновления части таблиц в пакетном режиме;
- наличие в колонках множества неопределённых значений, дающих значительную асимметрию распределения значений колонки;
- присутствие в БД BLOB-объектов.

Новым поколением, призванным справиться с данной проблемой и учитывающим эти ограничения,

являются NewSQL-системы, предназначенные, в первую очередь, для предприятий, которые планируют:

- миграцию существующих приложений для адаптации к новым тенденциям роста объема данных;
- разработку новых приложений с высокой масштабируемостью систем OLTP;
- опору на существующие знания использования OLTP.

Однако учитывая относительную новизну данных решений и тот факт, что большинство из них всё ещё постоянно нуждаются в постоянной доработке и оптимизации, а также неопределённость выбора варианта развёртывания системы на предприятии, будь то DBaaS либо же экземпляр виртуальной машины, возникает необходимость проведения исследования в данном направлении, чтобы описать, когда требуется то или иное решение, а также формализовать методики по использованию данных систем при работе с конкретными БД.

Термин NewSQL – это сокращение для различных новых масштабируемых и высокопроизводительных SQL баз данных. NewSQL-поставщики имеют общую разработку новых продуктов для реляционных баз данных и услуг, призванных изменить реляционную модель для распределенных архитектур или для повышения производительности реляционных баз данных при условии, что горизонтальная масштабируемость больше не является необходимостью [2].

В статье ставится следующая задача: провести анализ имеющихся на рынке NewSQL СУБД, выбрать лучшую из доступных и адаптировать её с учётом архитектурных особенностей БД в частном «облаке» (модель обеспечения повсеместного и удобного сетевого доступа по требованию к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов, предоставляемому внутренней ИТ-службой предприятия). В решении будут использоваться БД СЭД DocsVision и БД системы бизнес-аналитики. Тестовым стендом будет являться кластер БД, построенный на платформе из четырёх серверов SuperMicro 2011 с процессорами Intel Xeon 2650 и 2620 и 48 GB DDR3 на каждом из них.

СУБД по умолчанию является MS SQL Server 2008R2 в редакции Standard и MySQL Cluster Carrier Grade 7.2. Задача будет разделена на четыре этапа:

- на первом этапе будут сформулированы технические требования к будущей системе, позволяющие выделить из всех NewSQL-систем наиболее подходящие;
- на втором этапе будет определён оптимальный способ размещения базы данных;
- на третьем – с использованием подготовленных запросов и тестов в отношении скорости их исполнения будут определены наиболее подходящие из выбранных на первом этапе СУБД;
- на четвертом этапе данные системы будут проанализированы и по возможности оптимизированы с учетом спецификации БД СЭД и БД системы бизнес-аналитики.

1. Ниже представлен набор минимальных требований к техническим характеристикам СУБД:

- SQL как основной механизм для взаимодействия;
- ACID-поддержка транзакций;
- механизм управления без применения блокировок;
- архитектура, обеспечивающая лучшую производительность узлов, чем любые из традиционных решений RDBMS;
- удобное масштабирование, способное управлять большим количеством узлов, не перенося «узкие» места;
- отказ от использования БД, опубликованных третьими лицами как «облачный» сервис (SQL Azure, Amazon RDS и др.);
- БД не должна использовать расширения традиционной SQL-архитектуры, наподобие Handler socket решений.

Ниже представлены классифицируемые на подгруппы NewSQL-системы (рис. 1), которые будут подвергнуты дальнейшему анализу [2].

Классификация NewSQL-систем основана на различных подходах, принятых сохранить SQL-интерфейс, а также решить масштабируемость и производительность, являющуюся проблемами традиционных решений OLTP:

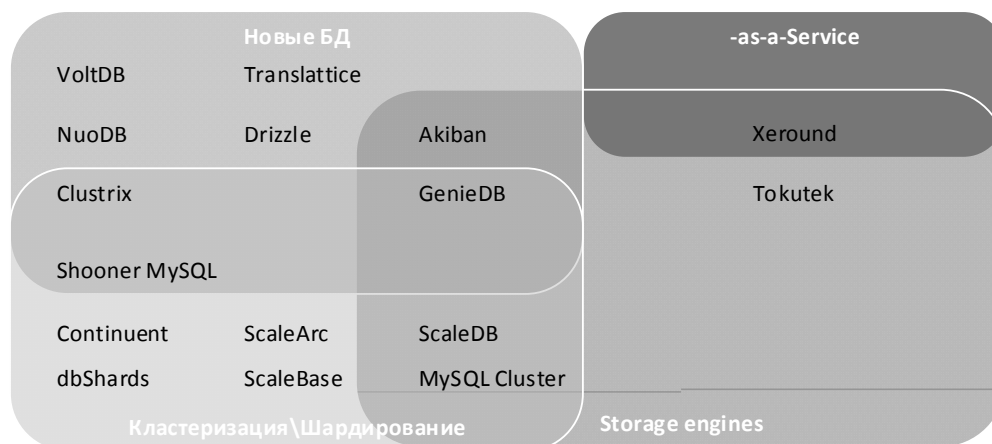


Рис. 1. NewSQL-системы

1) новые базы данных: NewSQL-система разрабатывается полностью с нуля с целью достижения масштабируемости и производительности;

2) новый механизм хранения MySQL (Storage engines): чтобы преодолеть проблемы масштабируемости MySQL, был создан ряд новых механизмов хранения, основанных на MySQL; положительной стороной данного решения является использование интерфейса MySQL; отрицательной – отсутствие миграции данных из других баз данных, включая старый MySQL;

3) прозрачное объединение в кластеры: эти решения сохраняют базы данных OLTP в своем оригинальном виде, но обеспечивают особенность расширения с прозрачной группировкой, гарантирующую масштабируемость [3].

Из описанных БД исключается группа Storage engines вследствие программной невозможности миграции данных из других БД. Группа «кластеризация/шардирование» не в полной мере отвечает необходимым требованиям, и поэтому на третьем этапе из этой группы будет рассмотрена лишь одна СУБД для обеспечения наглядности тестов производительности.

2. Немаловажным аспектом является вариант размещения БД, подразумевающий следующее:

- тип сервера, на котором будет развернута БД: виртуальный или физический;
- дисковая подсистема;
- архитектура решения: количество нод, способ их размещения, маршрутизация;
- наличие консоли управления ресурсами (DBaaS).

Для улучшения быстродействия кластер БД будет развернут на физических серверах. Так как основное предназначение данного решения – обработка данных внутри компании (частное «облако»), консоль управления ресурсами самой СУБД не имеет критической

важности. Особенностью конфигурации данных серверов является использование SSD- (Solid State Drive) накопителей помимо использования RAID 10 массива с обычными SAS-винчестерами. В то время когда под TempDB и журналы транзакций выделяются SSD, расположенные непосредственно на серверах, сама БД находится в хранилище. Такое решение позволяет смоделировать распределенную среду компании, с головным офисом и филиалами, удаленными территориально. Помимо этого, данная архитектура позволяет максимально эффективно использовать пул вычислительных ресурсов, удовлетворяя характеристикам, присущим частному «облаку». Общая схема размещения представлена на рис. 2.

3. Предъявленным требованиям, описанным на первом этапе, в полной мере удовлетворяют 2 СУБД: VoltDB и NuoDB. Clustrix и Continuent, основанные на MySQL, приведены для сравнения производительности. Данные СУБД опираются на идеологию «Shared Nothing»: в кластере, созданном в такой идеологии, узлы не разделяют ресурсы между собой. Каждый узел обрабатывает свой фрагмент базы. За счет этого существенно возрастает производительность и масштабируемость системы с такой организацией на нагрузках любого типа [1].

Сложность данной прикладной задачи определяется двумя параметрами:

- большим объемом данных;
- большим количеством одновременных транзакций.

Если в СЭД SSD-накопители, более близкие по скорости к оперативной памяти, чем к классическим винчестерам, могут эффективно решать задачу с обработкой BLOB (binary large object), то при работе с OLAP-кубами при интенсивной транзакционной нагрузке определяющим фактором производительности уже становится сама архитектура СУБД.

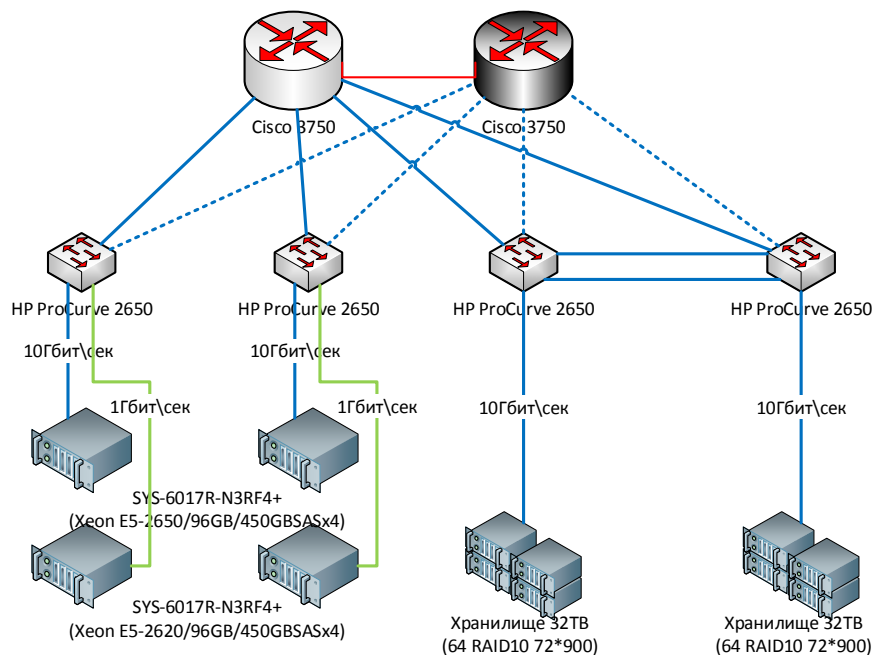


Рис. 2. Общая схема размещения кластера БД

Методика тестирования представлена двумя видами тестов: «формальными» и функциональными. Под формальными тестами понимается выполнение неких стандартных операций при заданных условиях на конкретном наборе данных. Такими тестами являются создание множества таблиц, вставка значений в таблицы, объединение таблиц, выборка значений. Функциональные тесты являются ориентированными на исследование характеристик СУБД при решении определенной прикладной задачи, исходные данные берутся непосредственно из СЭД и системы бизнес-аналитики.

Для измерения результатов производительности были созданы 50 таблиц с приведённой ниже схемой:

CREATE TABLE **new_table**;

```
ALTER TABLE new_table ADD COLUMN
  id character varying(20) NOT NULL,
  seq integer NOT NULL,
  col3 character varying(16) NOT NULL,
  col4 character varying(5) NOT NULL,
  col5 character varying(50) NOT NULL,
  col6 character varying(1000),
  col7 character varying(300) NOT NULL,
  col8 character varying(150),
  col9 timestamp NOT NULL,
  col10 smallint DEFAULT 0 NOT NULL,
  col11 timestamp NOT NULL,
  col12 character varying(15) NOT NULL,
  col13 character(1) NOT NULL,
  col14 character(1) NOT NULL,
  col15 timestamp DEFAULT timestamp NOT
  NULL;
```

```
ALTER TABLE "new_table" ADD PRIMARY
KEY("id","seq");
CREATE UNIQUE INDEX "iuk_table" ON
"new_table"("id","col3","col4","col5");
CREATE INDEX "ink1_table" ON
"new_table"("id","col9" DESC,"col14").
```

Далее система проходила 3 этапа формальных тестов:

1) после создания базы данных для вставки 31 миллиона записей данных в 50 таблиц производительность измеряется при нагрузке INSERT FULL (ПОЛНАЯ ВСТАВКА) в течение 30 мин;

2) после создания базы данных для вставки 80 миллионов записей данных в 50 таблиц производительность измеряется при нагрузке SELECT (ВЫБОР), ограниченной возможностями центрального процессора (CPU Bound);

3) после создания базы данных для вставки 80 миллионов записей данных в 50 таблиц производительность измеряется при нагрузке SELECT, ограниченной скоростью ввода-вывода (I/O Bound).

Все вышеперечисленные нагрузки создавались в 56 потоках. Один INSERT состоит из одного запроса INSERT, тогда как SELECT состоит из трех запросов SELECT с первичным ключом, уникальным индексом и неуникальным индексом в каждом [4].

Функциональным тестом являлся запрос к СЭД, очищающий БД от сообщений неактивных бизнес-процессов. Названия таблиц были изменены:

```
DELETE [table_1]
FROM [table_1]mes
JOIN [table_2]main ON
mes.InstanceID=main.InstanceID
WHERE main.state !=1
```

Ниже в таблице представлены результаты тестирования производительности.

Рассмотрим результаты детально: производительность NewSQL-систем выше производительности стандартных OLTP решений в среднем в 1,36 раза. Системы, основанные на методах кластеризации и шардирования, показывают средний результат.

После создания базы данных с 50 таблицами производилось тестирование производительности (рис. 3) с нагрузкой, ограниченной возможностями ЦП (SELECT 5 PRO FULL) и скоростью ввода-вывода (SELECT 100 PRO FULL), в течение 10 минут. В нагрузке с SELECT 5 запросами, область поиска запроса была сужена для того, чтобы полностью разместить необходимую страницу в буфере памяти и поддерживать желаемое 100%-ное значение результативности буфера.

Результаты тестирования производительности СУБД

		SQL		NewSQL			
		MS SQL Server	MySQL CCG	Кластеризация\Шардирование		Новые БД	
				Continuent	Clustrix	NuoDB	VoltDB
Транзакций в секунду	INSERT FULL	5890	5196	7105	6887	7193	7980
	SELECT 5 PRO FULL	4201	4206	4533	4421	2646	4059
	SELECT 100 PRO FULL	1389	1416	1680	1512	2150	2318
Время (минуты)	Очистка сообщений в СЭД	242	-	-	-	142	103
	Очистка сообщений в СЭД после оптимизации	-	-	-	-	129	91
INSERT FULL	IO Write	7534	6899	10952	10860	12096	13779
	IO Read	7110	6297	10341	10250	10841	12154
% использован ия CPU	INSERT FULL	80%	60%	95%	100%	100%	100%
	SELECT 5 PRO FULL	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	SELECT 100 PRO FULL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	QUERY	100%	-	-	-	100%	100%

В SELECT 100, чтобы не размещать необходимую страницу в буфере памяти полностью и предотвратить частую замену страниц, область поиска запроса SELECT, наоборот, была расширена. Количество операций ввода-вывода увеличилось, так как рабочая нагрузка весьма интенсивна.

В первом случае при отсутствии операций ввода-вывода производительность NewSQL решений падает по сравнению с SQL-системами. При этом если производительность VoltDB остается в среднем на том же уровне, то потеря производительности NuoDB очевидна. Во втором случае NewSQL-системы уверенно опережают по производительности MS SQL Server и MySQL CCG.

Следующий тест – подготовленный запрос (рис. 4) в БД СЭД.

Здесь отчетливо видно преимущество VoltDB. NuoDB, как представитель NewSQL, так же показывает результаты, превосходящие SQL решение по скорости обработки почти в 2 раза.

В целом настоящий эксперимент подтверждает тот факт, что при увеличении нагрузки NewSQL-решения показывают лучшие результаты по сравнению с классическими OLTP SQL-системами. При этом из рассмотренных систем для использования в компании выбор падает на VoltDB – именно эта СУБД показала наилучшие результаты в ходе тестирования.

4. Сформулированы правила, разработанные в ходе конфигурирования и тестирования, представляющие собой методики оптимизации БД СЭД и БД системы бизнес-аналитики и оптимизации обращений к ним для NewSQL-систем в целом и для VoltDB в частности:

- по возможности разделять транзакции для таблиц, чтобы максимизировать частоту однораздельных транзакций и минимизировать частоту многораздельных транзакций;
- оценивать объемы данных и частоту каждой транзакции для приложения, чтобы определить, какие столбцы использовать для разметки;
- использовать несколько SQL-запросов в хранимых процедурах. Десять SQL-запросов в одной однораздельной процедуре может быть в 10 раз быстрее, чем десять процедур с одним запросом в каждой;
- устанавливать флаг IsFinal истинным в последнем вызове VoltExecuteSQL () в каждой хранимой процедуре СУБД VoltDB. Это повышает производительность, особенно для многораздельных транзакций;
- так как различные приложения и аппаратные средства имеют разные характеристики, лучше использовать бенчмаркинг разметки для определения оптимального количества разделов для приложения;
- по возможности использовать асинхронные вызовы процедур и создания клиентских подключений ко всем узлам в кластере, чтобы максимизировать пропускную способность;
- нежелательно создавать таблицы с очень большим количеством строк (т. е., много столбцов или большие столбцы типа VARCHAR). Лучше создать несколько меньших таблиц с общим ключом разделения;
- нежелательно создавать запросы, которые возвращают большие объемы данных (например, SELECT * FROM TABLE без каких-либо ограничений), особенно для многораздельных транзакций;

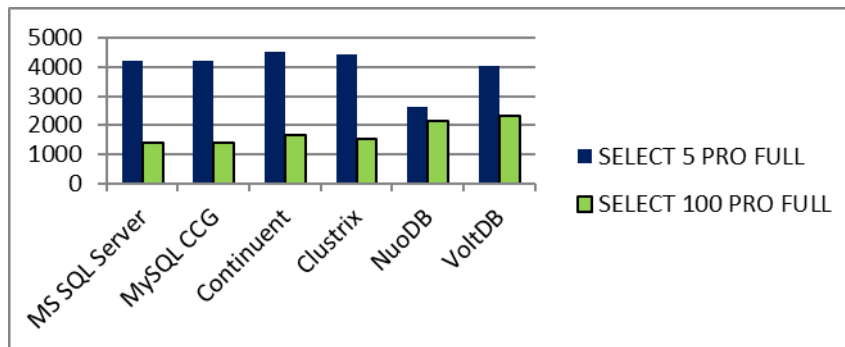


Рис. 3. Количество транзакций в секунду при выполнении операции SELECT

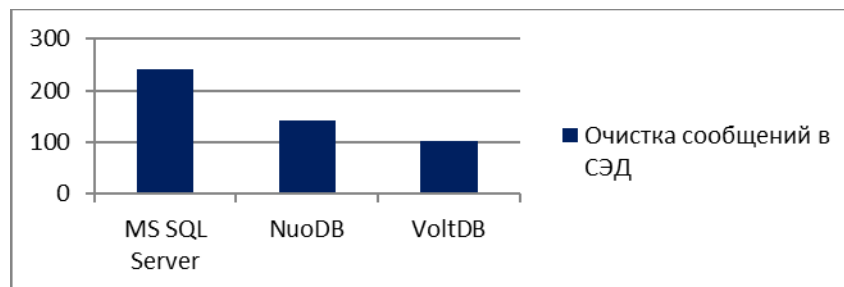


Рис. 4. Время исполнения запроса (в минутах) на очистку сообщений из БД СЭД

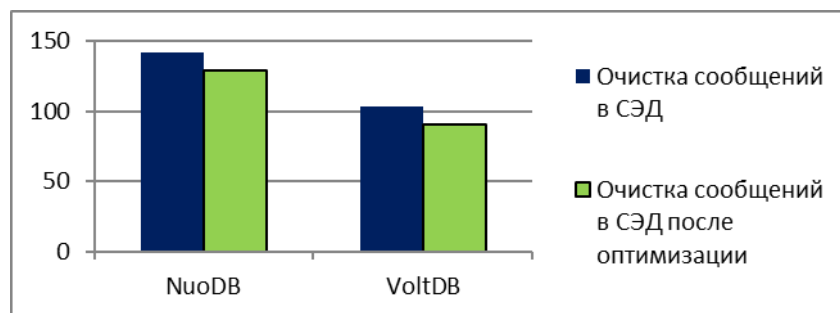


Рис. 5. Время исполнения запроса (в минутах) на очистку сообщений из БД СЭД до и после оптимизации

– даже небольшие таблицы должны быть разделены и не должны дублироваться, если они часто обновляются;

– не рекомендуется делать большую обработку в асинхронных обратных вызовах. За один раз обрабатывается только один обратный вызов, так что лучше делать эффективные процедуры обратного вызова, чтобы избежать задержек;

– не стоит тестировать приложения на standalone-серверах;

– не желательно вызывать ClientFactory.createClient () более одного раза в каждом клиентском приложении, иными словами, должен быть только один экземпляр клиента в пределах каждого клиентского приложения.

Данные правила позволили поднять производительность СУБД в среднем ещё на 9–17 % (рис. 5) в зависимости от конкретной задачи. Данные правила не являются универсальными, но их можно рассматривать не только применительно к БД компании, но и в целом к БД, хранящим в себе BLOB и имеющим более 10000 транзакций в секунду. В целом, использование правильно сконфигурированного NewSQL-решения позволило достичь необходимого уровня производительности без тотального изменения структуры БД, а также добиться прозрачного масштабирования на будущее. Самое главное в таком решении в отличие от standalone-конфигурации сервера баз данных, что оно полностью соответствует критериям, предъявляемым к частному «облаку»: объединение ресурсов, унифицированность и эластичность.

Библиографические ссылки

1. Кластерные СУБД [Электронный ресурс] // Информационный бюллетень компании «Инфосистемы

Джет» : [сайт]. URL: http://www.jetinfo.ru/stati/klasteranye#gl_2 (дата обращения: 07.07.2013).

2. MySQL vs. NoSQL and NewSQL – survey results [Электронный ресурс] // The 451 group : [сайт]. URL: <http://blogs.the451group.com/opensource/2012/05/25/mysql-vs-nosql-and-newsql-survey-results/> (дата обращения: 07.05.2013).

3. NewSQL – The New Way to Handle Big Data [Электронный ресурс] // Linux for you : [сайт]. URL: <http://www.linuxforu.com/2012/01/newsq-handle-big-data/> (дата обращения: 10.06.2013).

4. CUBRID vs. MySQL performance test results before and after the SSD usage [Электронный ресурс] // CUBRID : [сайт]. URL: http://www.cubrid.org/ssd_performance_test (дата обращения: 08.07.2013).

References

1. *Klasternye SUBD. Informatsionnyy byulleten' kompanii "Infosistemy Dzheta"*. Available at: http://www.jetinfo.ru/stati/klasteranye#gl_2 (date of view: 07.07.2013).

2. MySQL vs. NoSQL and NewSQL – survey results. The 451 group. Available at: <http://blogs.the451group.com/opensource/2012/05/25/mysql-vs-nosql-and-newsq-survey-results/> (accessed: 07.05.2013).

3. NewSQL – The New Way to Handle Big Data. Linux for you. Available at: <http://www.linuxforu.com/2012/01/newsq-handle-big-data/> (accessed: 10.06.2013).

4. CUBRID vs. MySQL performance test results before and after the SSD usage. CUBRID. Available at: http://www.cubrid.org/ssd_performance_test (accessed: 08.07.2013).

© Соболев А. С., 2013

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ К ИМИТАЦИОННЫМ ПОМЕХАМ

А. В. Черноусов¹, А. В. Кузовников¹, В. Г. Сомов²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: chernousovaalexey@gmail.com

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Оценивается устойчивость сигналов к имитационным помехам. Рассчитывается вероятность навязывания сигналов и безопасное время работы систем радиосвязи. Предложено три алгоритма формирования сигналов в системах радиосвязи. Сделан вывод о целесообразности использования вейвлет-модулированных широкополосных сигналов в системах радиосвязи с целью борьбы с имитационными помехами.

Ключевые слова: вейвлет, широкополосный сигнал, модуляция, безопасное время работы, вероятность навязывания, имитационная помеха.

THE ASSESSMENT OF BROADBAND SIGNALS IMMUNITY AGAINST SIMULATION ECHOES

A. V. Chernousov¹, A. V. Kuzovnikov¹, V. G. Somov²

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: chernousovaalexey@gmail.com

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

Broadband signals immunity against simulation echoes is assessed. Probability of signals intrusion and safety running time for communication systems are calculated. Three algorithms of signals forming in communications systems are provided. The conclusion that it is reasonable to use the wavelet modulated broadband signals in communication systems for the purpose of simulated echoes suppression is made.

Keywords: wavelet, broadband signal, modulation, safety running time, probability of intrusion simulated echo.

Системы радиосвязи подвержены негативному воздействию со стороны различного типа помех, в то же время существуют способы обнаружения каналов связи и методы несанкционированного доступа для добывания информации или навязывания имитационных помех с целью их радиоподавления. В связи с этим актуальной является проблема организации безопасной связи, обеспечивающей конфиденциальность и имитостойкость.

Задачи обеспечения конфиденциальности решаются применением современных способов криптографии. В настоящее время активно развивается направление обеспечения имитостойкости радиоканалов. Возможности воздействия имитопомех (имитонападения) значительно расширились. Процесс воздействия значительно изменился на канальном, сервисном и аппаратном уровнях.

В статье [1] приводится следующее определение имитационной помехи и имитационной стойкости: «Согласно принятому определению, под имитационной помехой понимают активное воздействие радиозлектронных средств, регистрируемое средством радиосвязи как полезный сигнал. Более полно сущность и возможности имитационных помех раскрыты в определении имитостойкости, под которой понимают

способность системы связи противостоять вводу ложной информации, несанкционированному доступу к передаваемой или принимаемой информации и навязыванию ложных режимов средствам связи». Исходя из этого определения, выделяют два типа имитационных помех для воздействия на автоматизированный радиоканал:

- первый тип – имитопомехи, воздействующие на радиоканалы дежурного приема;
- второй тип – имитопомехи, воздействующие в момент передачи сообщения (во время сеанса связи).

Возможность применения имитопомех того или иного типа определяется длительностью передачи сигнала и инерционностью систем радионаблюдения (РН) и радиоэлектронного воздействия (РЭВ).

В связи с этим выделяют понятие «имитационная стойкость системы связи». Система является стойкой к воздействию имитационных помех, если задача подбора имитационной помехи требует больше времени, чем продолжительность передачи сигнала в канале связи.

Проблема имитостойкости радиоканалов частично решается применением методов (средств) повышения скрытности работы СРС, направленных на затруднение обнаружения радиосигналов подсистемой радио-

разведки и, следовательно, на затруднение создания помех [2]. Одним из таких методов является применение в системах радиосвязи широкополосных сигналов.

Широкополосными (сложными, шумоподобными) сигналами (ШПС) являются такие сигналы, у которых произведение ширины спектра F на длительность T много больше единицы. Это произведение называется базой сигнала B . Для ШПС

$$B = F \times T \gg 1. \quad (1)$$

В системах связи с ШПС ширина спектра излучаемого сигнала F всегда много больше ширины спектра информационного сообщения.

Одними из основных преимуществ, за счет которых ШПС получили применение в широкополосных системах связи (ШПСС), являются:

- обеспечение высокой помехоустойчивости связи;
- создание системы связи с повышенной скрытностью;
- обеспечение электромагнитной совместимости ШПСС с узкополосными системами радиосвязи и радиовещания, системами телевизионного вещания.

В случае формирования сигналов в системах связи при помощи вейвлет-модуляции и применения псевдослучайных последовательностей задача формирования имитационной помехи сводится к двум подзадачам:

- 1) обнаружение передаваемого сигнала;
- 2) формирование имитационной помехи с использованием информации, полученной при обнаружении передаваемого сигнала.

В рамках данной статьи произведена оценка устойчивости следующих сигналов к имитационным помехам:

- узкополосный, фазомодулированный сигнал;
- широкополосный фазомодулированный сигнал;
- широкополосный вейвлет-модулированный сигнал с фиксированными значениями формирующих параметров Fb, Fc ,

Алгоритмы формирования сигналов, приведенных выше, отображены на рис. 1–3.

На рис. 1 представлен алгоритм формирования узкополосного фазомодулированного сигнала. Информационный сигнал поступает на вход модулятора, где умножается на сигнал с несущей частотой и передается абонентам.

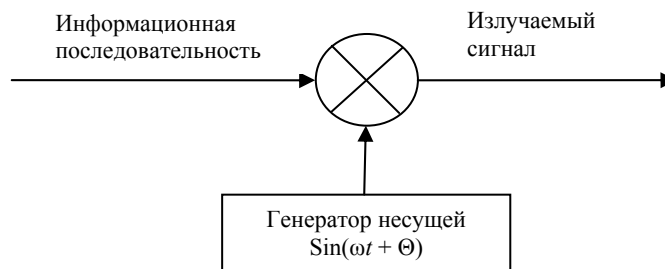


Рис. 1. Формирование узкополосного фазомодулированного сигнала.

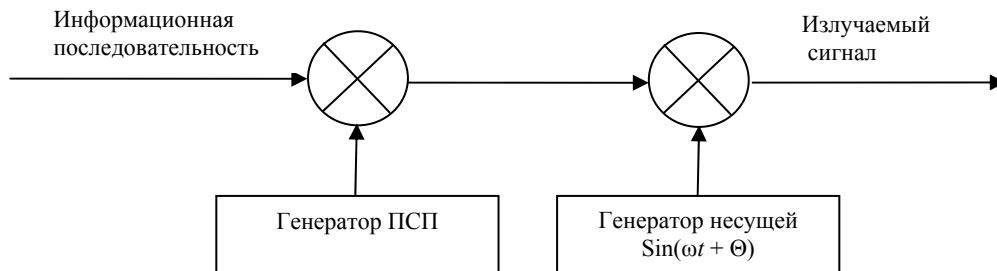


Рис. 2. Формирование широкополосного фазомодулированного сигнала

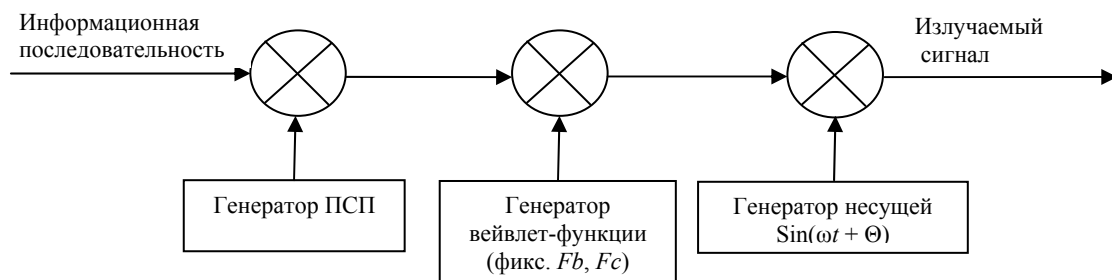


Рис. 3. Формирование вейвлет-модулированного широкополосного сигнала с фиксированными значениями параметров модулирующей функции

На рис. 2 представлен алгоритм формирования широкополосного фазомодулированного сигнала. Информационный сигнал расширяется при помощи псевдослучайной последовательности (ПСП). После чего сигнал поступает на вход модулятора, где умножается на сигнал с несущей частотой и передается абонентам.

На рис. 3 представлен алгоритм формирования вейвлет-модулированного широкополосного сигнала (W ШПС) с фиксированными значениями вейвлет-функции (Fb , Fc). Информационный сигнал расширяется при помощи псевдослучайной последовательности. После чего сигнал поступает на вход модулятора. При модуляции, полученной ПСП, каждый бит модулируется вейвлетом с фиксированным значением формирующих параметров. Затем сигнал, модулированный вейвлетом, умножается на сигнал с несущей частотой и передается абонентам.

Для сигналов, сформированных каждым приведенным алгоритмом, посчитана вероятность навязывания и безопасное время. Расчет был произведен согласно методике, отображенной в статье [3].

Для вычислений были определены следующие параметры:

- 1) $N_{псп}$ – количество ПСП (в зависимости от длины);
- 2) K_b – количество вейвлетов;
- 3) $m, n = 50$ – число параметров Fb и Fc , используемых для формирования вейвлета.

Полученные результаты отображены в табл. 1, 2.

Для вычисления безопасного времени работы использовалась формула

$$T_6 = \frac{1}{2} Z \cdot t_{опр}, \quad (2)$$

где T_6 – математическое ожидание времени статистического опробования всевозможных вариантов навязывания противником сигнала с использованием всего пространства $\{Z\}$ сложных сигналов; $T_{опр}$ – время передачи имитационного сигнала.

$$T_{опр} = \frac{1}{R_{п}}, \quad (3)$$

где $R_{п}$ – скорость имитационного воздействия противника.

Очевидно, что на скорость имитационного воздействия противника влияет множество параметров. Среди них:

- инерционность систем РН и РЭВ;
- время, затрачиваемое на обнаружение сигнала;
- время, затрачиваемое на передачу сигнала.

В данной статье для расчета безопасного времени во внимание принималось лишь время, затрачиваемое на передачу сигнала. Это позволило абстрагироваться от влияния параметров систем РН и РЭВ и сосредоточиться только на влиянии алгоритмов формирования сигналов на их способность противостоять имитационным помехам.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о том, что наибольшей имитостойкостью, а значит, наилучшей способностью противостоять имитационным помехам обладает вейвлет-модулированный широкополосный сигнал с фиксированными значениями параметров модулирующей функции. Например, применение данного алгоритма формирования сигнала позволяет увеличить безопасное время передачи информационной последовательности на 4,69 с для длины ПСП 32 бита. Тогда как широкополосный фазомодулированный сигнал увеличивает безопасное время передачи всего лишь на 3,1E–4 с для аналогичной длины ПСП. А узкополосный фазомодулированный сигнал никак не влияет на изменение безопасного времени передачи, так как вероятность его навязывания 100 %.

Стоит отметить, что исходные данные носят прикладной характер, и для их уточнения следует провести более детальные исследования. Например, по результатам исследований для формирования широкополосных сигналов наиболее предпочтительным является вейвлет Шеннона, следовательно, можно сократить априорное значение до 1. То же самое касается и других параметров.

Таблица 1

Вероятность навязывания сигнала

Алгоритм формирования	Вероятность навязывания
Узкополосный фазомодулированный сигнал	1
широкополосный фазомодулированный сигнал	1,6E–1
W ШПС с фиксированными значениями параметров модулирующей функции	1,1E–5

Таблица 2

Безопасное время работы

Алгоритм формирования	Длина ПСП					
	32	64	128	256	512	1024
Узкополосный фазомодулированный сигнал	–	–	–	–	–	–
Широкополосный фазомодулированный сигнал	3,1E–4	6,3E–4	1,3E–3	2,5E–3	5E–3	1E–2
W ШПС с фиксированными значениями параметров модулирующей функции	4,69	9,53	1,92E+1	3,86E+1	7,73E+1	1,55E+2

Для определения влияния инерционности систем РН и РЭВ, времени, затрачиваемого на обнаружение сигнала, вероятности правильного априорного определения параметров формирующих функций необходимо более детальное исследование.

Библиографические ссылки

1. Орошук И. М. Основные направления применения имитационных помех в системах радиосвязи. Классификация способов ими [Электронный ресурс] // Центр информационной безопасности : портал. 2005. URL: <http://www.bezpeka.com/ru/lib/spec/metr/art184.html>.
2. Ширман Я. Д. Теоретические основы радиолокации. М. : Сов. радио, 1970. 561 с.
3. Воронов Д. Н. Критерии оценки имитостойкости командно-телеметрических радиолоний // Системы обработки информации. 2007. № 4(62). С. 14–16.

References

1. Oroschuk I. M. [Main pathways of simulated echoes application in communication systems. Classification of simulated echoes]. *Tsentr informatsionnoy bezopasnosti: portal*. 2005 (In Russ.) Available at: URL: <http://www.bezpeka.com/ru/lib/spec/metr/art184.html>.
2. Shirman Y. D. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical foundations of radiolocation). Moscow, Soviet radio, 1970, 561 p.
3. Voronov D. N. *Sistemi obrobki informatsii*. 2007, no. 4 (62), p. 14–16.

© Черноусов А. В., Кузовников А. В.,
Сомов В. Г., 2013

УДК 004.056

МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА УЯЗВИМОСТЕЙ В БИНАРНОМ КОДЕ*

М. О. Шудрак, В. В. Золотарев, И. А. Лубкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: mxmssh@gmail.com

Описывается методика и ее реализация в виде программного продукта, осуществляющая обнаружение уязвимостей в бинарном коде с использованием сочетания технологий динамической бинарной инструментации, анализа покрытия кода и так называемого фаззинга – технологии генерации потенциально ошибочных данных и мониторинга результата. В результате было разработано программное средство для поиска уязвимостей в сетевых и файловых приложениях, позволяющая значительно оптимизировать процесс динамического тестирования.

Ключевые слова: динамический анализ, уязвимость, фаззинг, бинарная инструментация.

THE TECHNIQUE FOR BINARY EXECUTABLES VULNERABILITIES DETECTION

M. O. Shudrak, V. V. Zolotarev, I. A. Lubkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: mxmssh@gmail.com

The article describes dynamic analysis techniques and cloud-based platform for software security and reliability testing. In the article the authors contribute to the dynamic execution analysis techniques. In the first part of the article the authors describe the technique of dynamic binary analysis which is referred to as fuzzing. The authors show basic architecture of the tool for security and reliability testing of application and vulnerabilities detection. Due to the use of the dynamic binary instrumentation this technique implementation is much faster than ones applied previously. The technique described in the article has been implemented as the software platform which includes web-interface, virtual machine dispatcher, dynamic instrumentation library, debugger, special dll, protocol description and fuzzing manager tool.

Keywords: dynamic analysis, vulnerability, fuzzing, binary instrumentation.

* Работа выполнена в рамках гранта по соглашению № 14.132.21.1365 от 22.10.2012 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

На сегодняшний день компании-разработчики ПО сталкиваются с серьезнейшими рисками, связанными с безопасностью собственных продуктов. Эти риски возникают вследствие того, что процесс разработки невозможен без тех или иных ошибок и недочетов. Так, за предыдущий год эксперты обнаружили более 9 000 различных уязвимостей «нулевого дня», а это 26 уязвимостей в день! Для решения этой проблемы используется множество различных методик и подходов, которые могут эффективно применяться на том или ином этапе разработки и эксплуатации ПО [1]. В данной статье мы остановимся лишь на динамическом анализе, являющемся наиболее эффективным для анализа бинарного кода, так как метод взаимодействует с реально работающим приложением [2; 3]. Наиболее существенным недостатком динамического анализа на сегодняшний день является сложность и высокая ресурсозатратность для полноценного поиска уязвимостей. Мы попытаемся частично решить эти проблемы.

Методика гибридного анализа бинарного кода.

Методика динамической бинарной инструментации предусматривает проведение тестирования приложения в процессе его исполнения. Как правило, уязвимость в ПО возникает в процессе обработки внешних или пользовательских данных. Для тестирования корректности обработки этих данных часто используется так называемая технология фаззинга, базовая схема которого приведена на рис. 1.

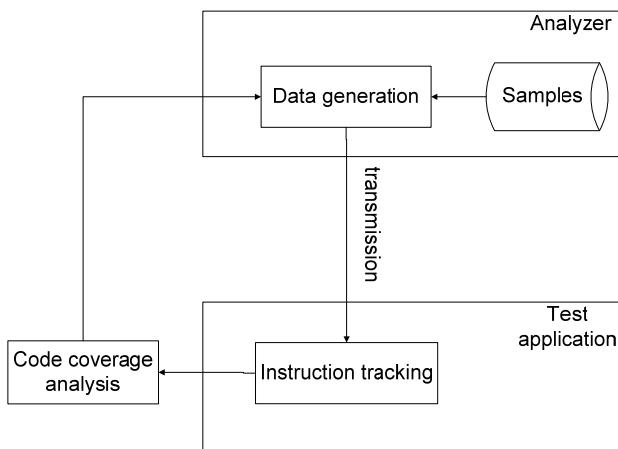


Рис. 1. Базовая схема системы

Опишем технологию динамического анализа и проведем сравнительный анализ полученного решения. Процесс динамического анализа ПО подразумевает анализ продукта в процессе его работы. Такой подход позволяет обнаружить ошибки и уязвимости, возникающие в процессе работы, которые непосредственно доступны для эксплуатации. Для этого система на основе предварительно описанного протокола автоматически генерирует тестовые данные и посылает их в выбранный интерфейс. Затем специальный модуль производит мониторинг исполняемых инструкций (строк кода) и ошибок в процессе выполнения программы. Однако необходимо отметить, что ис-

пользование такой технологии значительно снижает производительность анализируемой программы. Для решения этой проблемы в рамках проекта было предложено использовать методику динамической бинарной инструментации (DBI) анализируемого модуля. Основная схема методики приведена на рис. 2.

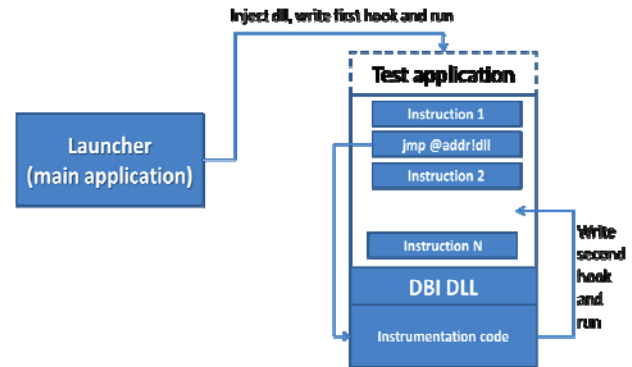


Рис. 2. Описание технологии DBI

Ее идея заключается в возможности перехвата и анализа графа потока управления программы с помощью вставки специальных инструкций в бинарный код анализируемого приложения. Эксперименты показали, что применение DBI позволяет анализировать программу на несколько порядков быстрее, чем при использовании классических методик автоматизированной отладки. Сравнение производительности выбранного решения приведено на рис. 3.

Для повышения гибкости описываемая платформа должна обладать возможностью описания протокола генерации тестовых кейсов с помощью специального языка. Для решения этой задачи был задействован хорошо зарекомендовавший себя ранее блоковый подход к описанию данных. Такой подход частично схож с описанием скриптов в классических языках программирования, однако в значительно урезанном виде. Тестовый пример и общее описание языковых конструкций приведено на рис. 4.

Помимо динамического анализа в процессе тестирования используются элементы методики статического анализа на этапе оценки степени опасности найденной ошибки. Для этого участок исходного или декомпилированного кода, на котором произошла ошибка, сравнивается с шаблонами уязвимого кода и в случае наличия совпадений производится классификация степени опасности данной уязвимости в соответствии с CVSS (Common Vulnerability Scoring System).

Отдельно необходимо остановиться на системе декомпиляции бинарного кода (декомпиляция – процесс восстановления относительно эквивалентного исходного кода из исполняемого модуля) в случае отсутствия исходного. Анализ бинарного кода является нетривиальной задачей в силу того, что в процессе компиляции исходного кода программы теряется важная с точки зрения анализа информация. Процесс анализа бинарного кода требует некоторого уровня его абстракции от машинного кода к человеку. Таким

образом, основная идея заключается в том, что декомпиляция бинарного кода не требует представления машинного кода на языке высокого уровня, достаточно восстановить алгоритм функционирования участка анализируемого кода (тем самым добиться соответствующего уровня абстракции). Для решения этой задачи необходимо рассматривать бинарные инструкции как совокупность элементарных операций над ресурсами, где в качестве ресурса могут выступать регистры, память или регистры флагов процессора.

Апробация технологии. Одним из самых важных требований, предъявляемых к системе, является возможность ее использования в различных операцион-

ных системах. Для этого было принято решение максимально (где это возможно) использовать кросс-платформенный язык программирования Python, а где невозможно – C/C++. Такой выбор был продиктован тем, что наряду со своими широкими возможностями, язык Python позволяет легко интегрироваться в проекты на C/C++. Для решения задачи отображения информации была реализована библиотека визуализации графа потока выполнения программы с возможностью фильтрации необходимой информации об уязвимых участках тестируемой программы. Пример детектирования уязвимости в тестовом FTP-сервере приведен на рис. 4.

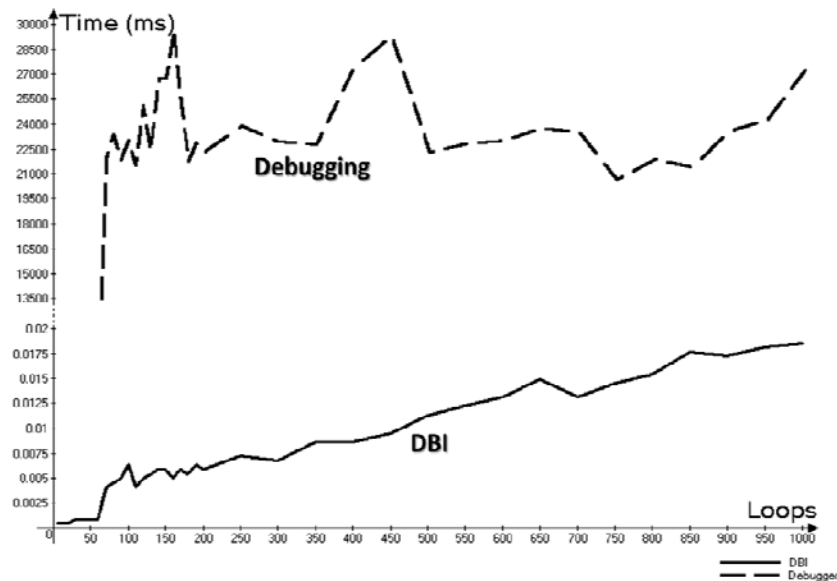


Рис. 3. Сравнение производительности решения

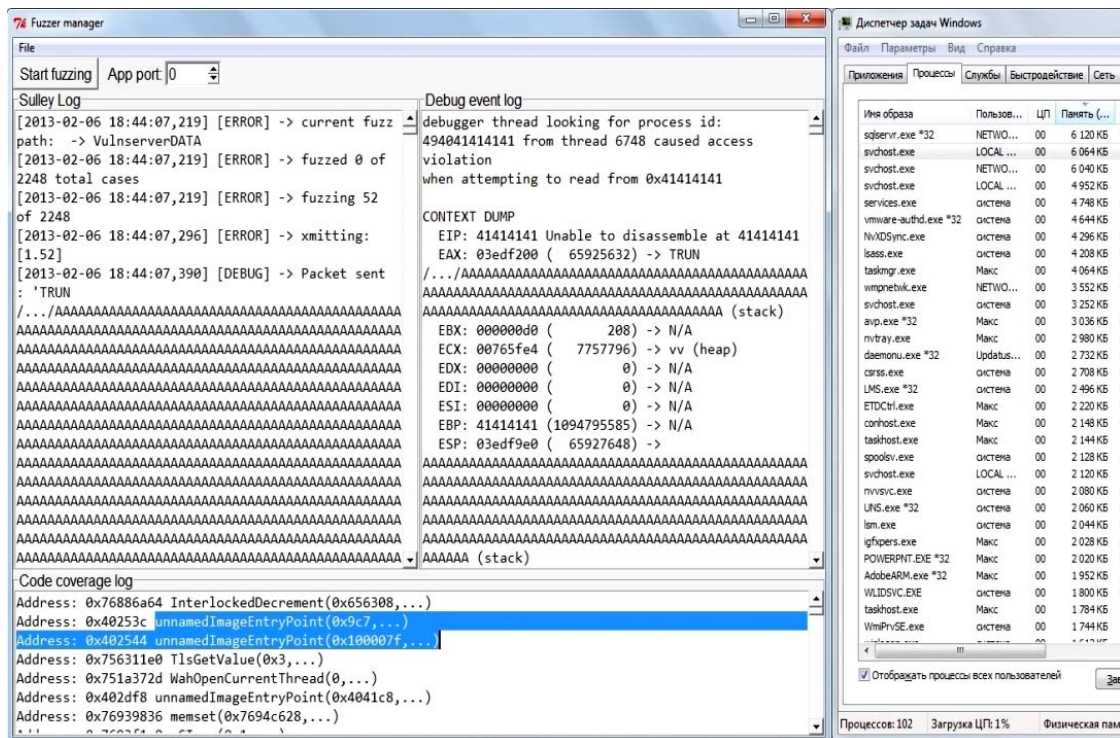


Рис. 4. Пример детектирования уязвимости

Ключевым этапом, отраженным на схеме, является генерация данных и анализ покрытия кода, который необходим для оценки эффективности проведенного тестирования. Не будем подробно останавливаться на каждом этапе работы системы, лишь отметим, что цель анализатора – сгенерировать данные, которые приведут к ошибке в тестируемом приложении. Для оценки эффективности такого тестирования необходимо оценить степень покрытия бинарного кода тестами. В ходе работы над программным средством были протестированы различные решения оценки покрытия кода: от отладки до динамической бинарной инструментации [4]. Последняя технология показала наиболее значительный прирост к скорости анализа (на 3–4 порядка в сравнении с отладкой). DBI-технология использует виртуальную машину уровня процесса ОС, в которую внедряется специальная dll, описывающая то, как необходимо проводить анализ тестируемой программы. Такая схема позволяет в значительной степени оптимизировать анализ, так как операционной системе нет необходимости в переключении контекста процессора между анализатором и тестируемой программой.

Разработанная система была реализована с использованием следующих фреймворков:

- 1) Sulley-фреймворк – для генерации тестовых данных [5].
- 2) Intel PIN – DBI фреймворк для виртуализации тестируемого приложения [6].
- 3) библиотека PyDBG – для отладки тестируемого приложения и перехвата исключений.

Таким образом, авторами была разработана методика и программное средство, обладающее возможностью тестирования различных приложений, обрабатывающих сетевой трафик и различные пользовательские файлы. На данный момент проект находится в стадии альфа-тестирования. Дальнейшая работа пред-

полагает расширение числа доступных протоколов для тестирования, использование более эффективных методик анализа покрытия кода, а также применение интеллектуальных алгоритмов для генерации тестовых данных с учетом результатов покрытия кода тестами.

В заключение хотелось бы отметить, что поиск уязвимостей является на сегодняшний день очень важным и необходимым этапом жизненного цикла разработки и поддержки ПО.

References

1. Giuseppe Desoli, Nikolay Mateev, Evelyn Duesterwald, Paolo Faraboschi, and Joseph A. Fisher. Deli: A new run-time control point. *In Proceedings of the 35th Annual Symposium on Microarchitecture (MICRO35)*, p. 257–270, Istanbul, Turkey, November 2002.
2. Henry S., Kafura D. Software structure metrics based on information flow. *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. SE-7, Issue 5, Sept. 1981, p. 510–518.
3. Marco Cova, Viktoria Felmetsger, Greg Banks, Giovanni Vigna. Static Detection of Vulnerabilities in x86 Executables, *Computer Security Applications Conference, 2006. ACSAC '06. 22nd Annual*, vol. 2, no. 7, p. 269–278.
4. DBI (2007). Available at: <http://uninformed.org/index.cgi?v=7&a=1&p=3> (accessed 14.10.2013).
5. Pedram Amini. Fuzzing Framework. *Black Hat USA*, vol. 14, Aug. 2007, p. 211–217.
6. PIN description. Available at: <http://software.intel.com/en-us/articles/pin-a-dynamic-binary-instrumentation-tool> (accessed 14.10.2013).

© Шудрак М. О., Золотарев В. В.,
Лубкин И. А., 2013

УДК 517.55

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ПРОДОЛЖЕНИИ КРАТНОГО СТЕПЕННОГО РЯДА С ПОМОЩЬЮ m -ОДНОРОДНЫХ ПОЛИНОМОВ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ В ОБОБЩЕННУЮ ЗВЕЗДУ МИТТАГ-ЛЕФФЛЕРА

Е. И. Яковлев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: yei@nm.ru

Рассмотрено аналитическое продолжение кратного степенного ряда в класс областей, обобщающих звездные. С помощью переразложения кратного степенного ряда по m -однородным полиномам строится продолжение этого ряда в $(m_1, \dots, m_n)$ -круговые области, которые являются естественным обобщением круговых областей в C^n . Опираясь на это разложение, данный кратный степенной ряд аналитически продолжается в максимальную m -звездную область, называемую m -звездой Миттаг-Леффлера функции f , определяемой этим рядом. Это аналитическое продолжение представляет собой суперпозицию m -однородных полиномов, по которым разлагается степенной ряд, с бесконечной треугольной матрицей, элементы которой не зависят от функции f . Приводится пример, когда m -звезда Миттаг-Леффлера отличается от обычной звезды Миттаг-Леффлера.

Ключевые слова: кратный степенной ряд, звезда Миттаг-Леффлера, главная звезда, аналитическое продолжение, суммирование кратного степенного ряда.

ABOUT ANALYTICAL CONTINUATION OF THE MULTIPLE POWER SERIES WITH THE m -HOMOGENEOUS POLYNOMIAL MATRIX METHOD TO THE GENERALIZED STAR MITTAG-LEFFLER

E. I. Yakovlev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: yei@nm.ru

The work is devoted to the analytical continuation of the multiple power series in the class of areas generalizing stars. With the help of multiple power series reanalysis by m -homogeneous polynomials constructed continuation of this series of in $(m_1, \dots, m_n)$ -circular area, which are a natural generalization of circular areas in C^n . Based on this decomposition, the multiple of a power series analytically continues maximum m -star region called m -star Mittag-Leffler function f defined by this row. This analytic continuation is a superposition of m -homogeneous polynomials, which decomposes a power series with an infinite triangular matrix, which elements do not depend on the function f . The paper contains an example, when m -star Mittag-Leffler differs from a normal star Mittag-Leffler.

Keywords: multiple power series, star of Mittag-Leffler, the main star, analytic continuation, summation of multiple power series.

В одномерном случае продолжение степенного ряда в максимальную звездную область впервые было построено Миттаг-Леффлером, поэтому такая область называется звездой Миттаг-Леффлера или главной звездой данного степенного ряда. Известны обобщения этого факта на случай нескольких переменных для класса звездных областей. В связи с новой волной интереса к суммированию расходящихся рядов, являющихся формальными решениями дифференциальных уравнений (например, [1–3]), в настоящей работе предлагается матричный метод, суммирующий ряд из полиномов в параболической звезде Миттаг-Леффлера или x -звезде Миттаг-Леффлера. Параболическая звезда Миттаг-Леффлера является естественным обобщением обычной звезды, но не всегда с ней совпадает. В работе приводится пример функции, у которой (1, 2)-звезда не совпадает с главной звездой.

Пусть $x \in R^n$; $x_1 > 0, \dots, x_n > 0$. Множество G в C^n назовем x -параболическим, если вместе с каждой точкой $z^0 = (z_1^0, \dots, z_n^0)$ в множестве G содержит x -отрезок

$$\{z \in C^n : z_1 = z_1^0 t^{x_1}, \dots, z_n = z_n^0 t^{x_n} : \forall t \in [0, 1]\} \subset G.$$

Область D из C^n с центром в точке a назовем обобщенно m -круговой $m = (m_1, \dots, m_n)$ $m_j \in N$ и $m_1, \dots, m_n$ взаимно просты), если вместе с каждой точкой $z_0 \in D$ область D содержит точки

$$\begin{aligned} \{z \in C^n : z_1 = a_1 + (z_1^0 - a_1)e^{im_1\theta}, \dots, \\ z_n = a_n + (z_n^0 - a_n)e^{im_n\theta}; \forall \theta \in [0, 2\pi]\}, \end{aligned}$$

т. е. образ окружности, проходящей через точку z_0 . Если область D содержит образ всего круга, то об-

ласть называется полной, т. е. вместе с точкой z_0 содержит множество

$$\begin{aligned} \{z \in C^n : z_1 = a_1 + (z_1^0 - a_1)\lambda^{m_1}, \dots, \\ z_n = a_n + (z_n^0 - a_n)\lambda^{m_n}; \forall \lambda : |\lambda| \leq 1\}. \end{aligned}$$

Если функция $f(z)$ голоморфна в некоторой окрестности начала координат в C^n , то максимальную x -параболическую область G_f^x , в которую голоморфно можно продолжить функцию f , назовем x -параболической звездой Миттаг-Леффлера функции f или просто x -звездой.

В случае одного переменного всякая x -звезда Миттаг-Леффлера совпадает с обычной звездой Миттаг-Леффлера или главной звездой данного степенного ряда. В случае многих переменных это не так.

Пример. Функция $f(z_1, z_2) = (1 - z_2 + z_1^2)^{-1}$ имеет главную звезду, отличную от (1,2)-звезды Миттаг-Леффлера. Это вытекает из того, звезда функции f в вещественном подпространстве C^2 не совпадает с (1,2)-звездой в силу особенностей функции f .

Таким образом, можно указать функцию, у которой (1, 2)-звезда несет больше информации, чем главная звезда или (1,1)-звезда.

Известно, что область сходимости n -кратного степенного ряда

$$f(z_1 \dots z_n) = \sum_{\|k\| \geq 0} a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n} \quad (1)$$

является полной логарифмически выпуклой n -круговой областью, содержащей нуль. Если члены ряда (1) переставить, то его область сходимости может измениться.

Классическая теорема о перераспределении ряда (1) по однородным полиномам приводит к круговым областям и имеется, например, в [4; 5].

Фиксируем $m = (m_1, \dots, m_n)$, $m_j \in \mathbb{N}^n$ и $m_1, \dots, m_n$ взаимно просты. Все члены ряда (1), у которых мультииндексы удовлетворяют уравнению

$$\langle k, m \rangle = k_1 m_1 + \dots + k_n m_n = v,$$

сгруппируем в полиномы

$$P_v(z) = \sum_{\langle k, m \rangle = v} a_{k_1 \dots k_n} z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n}$$

Полиномы $P_v(z)$ удовлетворяют равенству $P_v(t^m z) = P_v(t^{m_1} z_1, \dots, t^{m_n} z_n) = t^v P_v(z)$ для произвольных $\forall t \in \mathbb{C}; \forall z \in \mathbb{C}^n$. Такие полиномы $P_v(z)$ обычно называют (m, v) -однородными или (m, v) -взвешенными. Они являются естественным обобщением однородных полиномов.

Тогда функцию f , заданную рядом (1), можно представить в виде

$$f(z) = \sum_{v=0}^{\infty} P_v(z). \quad (2)$$

Область сходимости ряда (2) – это максимальная m -круговая область, которую можно поместить в область голоморфности функции f .

Область сходимости ряда (2) – полная обобщенно m -круговая область D в $\mathbb{C}^n$. Верно и обратное утверждение, т. е. по аналогии с теоремой 3 из [4, с. 53], справедлива Теорема 1.

Теорема 1. Любую функцию f , голоморфную в полной обобщенно m -круговой области D в $\mathbb{C}^n$ с центром в нуле, можно разложить в ряд (2) по m -однородным полиномам, который будет сходиться равномерно на любом компакте из D .

Доказательство. Ряд (1) абсолютно сходится с достаточно малой окрестности U начала координат в D , следовательно, в этой окрестности будет сходиться и ряд (2). Возьмем произвольную точку z_0 из области D , так как область D , является полной обобщенно m -круговой, существует $\lambda_0 \in \mathbb{C} : w_0 = \lambda_0^m z_0 \in U$. Ряд (2) сходится в точке w_0 и задает при достаточно малых λ голоморфную функцию φ :

$$f(w) = f(\lambda^m z) = \sum_{v=0}^{\infty} P_v(\lambda^m z) = \varphi(\lambda)$$

Разложение функции φ в ряд Тейлора в начале координат имеет вид

$$\varphi(\lambda) = \sum_{v=0}^{\infty} P_v(\lambda^m z) = \sum_{v=0}^{\infty} P_v(z) \lambda^v \quad (3)$$

Функция f голоморфна в некоторой окрестности точки z , поэтому функция φ , как суперпозиция голоморфных функций, голоморфна при $|\lambda| < 1 + \varepsilon$ для некоторого $\varepsilon > 0$, следовательно ряд (3) будет сходиться при $\lambda = 1$, что, в свою очередь, означает сходимость ряда (2) в точке z .

Точка z принадлежит D с некоторой окрестностью $U(z)$, для всех точек $U(z)$ можно повторить рассуждения, приведенные выше, поэтому ряд (2)

сходится в некоторой окрестности точки z , лежащей в D .

Пусть K компактно лежит в D . Каждому $z \in K$ соответствует некоторая достаточно малая окрестность $\overline{U(z)} \subset D$, в которой ряд (2) будет сходиться абсолютно и равномерно для точек $U(z)$. Совокупность $U(z)$ является открытым покрытием $\overline{K}$; выбирая из этого покрытия конечное подпокрытие, получим равномерную сходимость ряда (2) во всех точках K . Теорема 1 доказана.

Зная разложение функции f по m -однородным полиномам с помощью матричного метода можно восстановить значения функции f всюду в m -звезде G_f^m

Миттаг-Леффлера функции f .

Теорема 2. Пусть функция f задана рядом (2) в некоторой непустой окрестности начала координат, $m \in \mathbb{N}^n$ и $G = G_f^m$ – ее m -звезда Миттаг-Леффлера. Тогда существует такая бесконечная матрица комплексных чисел $B := \{b_{0,l}, \dots, b_{k_l,l}\}_{l=0}^{\infty}$, что справедлива формула:

$$f(z) = \sum_{l=0}^{\infty} b_{0,l} P_0(z) + \dots + b_{k_l,l} P_l(z). \quad (4)$$

Причем сходимость – равномерная на любом компакте в G , и матрица B не зависит от функции f , а зависит лишь от области G .

В случае одного переменного формула (4) имеется в двухтомнике Маркушевича [6, с. 495] и называется разложением Миттаг-Леффлера. В случае многих переменных для класса звездных областей теорема 2 доказана М. Довнарлович по схеме, предложенной Сичаком [7].

Доказательство. Для произвольной точки z_0 из области G найдется окрестность этой точки $V(z_0)$, компактно лежащая в G , и жорданов путь S_{z_0} в $\mathbb{C}$, охватывающий точки 0 и 1, такие, что

$$K := \left\{ \begin{array}{l} \zeta \in \mathbb{C}^n : \zeta = (\lambda^m z) = (\lambda^{m_1} z_1, \dots, \lambda^{m_n} z_n), \\ \lambda \in S_{z_0}; z \in V(z_0) \end{array} \right\}$$

и K компактно лежит в G .

Тогда по формуле Коши имеем:

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{S_{z_0}} f(\lambda^m z) \frac{d\lambda}{\lambda - 1} = \\ &= \frac{1}{2\pi i} \int_{S_{z_0}} f(\lambda^m z) \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^{-1} \frac{d\lambda}{\lambda}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как множество $\tilde{S}_{z_0} := \{\lambda^{-1} : \lambda \in S_{z_0}\}$ компактно лежит в $\{\mathbb{C} \setminus [1, \infty)\}$, то в силу известной теоремы Рунге функцию $\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^{-1}$ можно равномерно аппроксими-

ровать полиномами M_l от $\frac{1}{\lambda}$ на $\tilde{S}_{z_0}$

$$\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^{-1} = \sum_{l=0}^{\infty} M_l \left(\frac{1}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) заметим, что из равномерной сходимости ряда (6) на любом компакте из области $\{C \setminus [1, \infty]\}$, допустимо почленное интегрирование.

Полиномы из ряда (2) можно найти по формуле

$$P_l(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{S_{z_0}} f(\lambda^m z) \frac{d\lambda}{\lambda^{l+1}}$$

Возьмем в качестве матрицы B коэффициенты полинома M_l . Полиномы M_l построены конструктивно в [6, с. 497] по методу П. Пенлеве и могут быть использованы вне зависимости от функции f . Теорема 2 доказана.

Библиографические ссылки

1. Balser W. Formal power series and linear systems of meromorphic ordinary differential equations. W. Springer-Verlag New York, 2000.
2. Рамис Ж.-П. Расходящиеся ряды и асимптотические теории. М. ; Ижевск : Ин-т. компл. исследований, 2002. 80 с.
3. Лейнартас Е. К., Яковлев Е. И. О разрешимости одной краевой задачи для полиномиального дифференциального оператора в классе функций экспоненциального типа // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 43–46.
4. Шабат Б. В. Введение в комплексный анализ. М. : Наука, 1985. 464 с.
5. Айзенберг Л. А., Зиновьев Б. С. Элементарные свойства и интегральные представления голоморфных

функций многих комплексных переменных. Красноярск : Изд-во КГУ, 1975, 156 с.

6. Маркушевич А. И. Теория аналитических функций. Т. 2. М. : Наука, 1967. С. 628.

7. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomials of n complex variables. Prace Mat., z. 17, 1975.

References

1. Balser W. Formal power series and linear systems of meromorphic ordinary differential equations. W. Springer-Verlag New York, 2000.
2. Ramis J.-P. *Raskhodyashchiesya ryady i asimptoticheskiye teorii* (Divergent series and asymptotic theory). M.-Ijevsk, Inst. comp. issl, 2002, 80 p.
3. Leinartas E. K., Yakovlev E. I. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2 (48), p. 43–46.
4. Shabat B. V. *Vvedeniye v kompleksnyy analiz* (Introduction to complex analysis). Moscow, Nauka, 1985, 464 p.
5. Aisenberg L. A., Zinoviev B. S. *Elementarnyye svoystva i integral'nyye predstavleniya golomorfnykh funktsiy mnogikh kompleksnykh peremennykh* (Elementary properties and integral representations of holomorphic functions of several complex variables). Krasnoyarsk, Krasn.un-t, 1975, 156 p.
6. Marcushevich A. I. *Teoriya analiticheskikh funktsiy* (Theory of analytic functions). Vol. 2, Moscow, Nauka, 1967, p. 628.
7. Downarovich M. Analytic continuation of series of homogeneous polynomials of n complex variables. Prace Mat., z. 17, 1975.



International Workshop on Mathematical Models and its Applications

The special issue of this VESTNIK journal is based on a selected subset of papers from the second International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA 2013) held in Krasnoyarsk, Russian Federation, in 2013. Original results in mathematical modeling for software- and hardware applications in various fields have been discussed among researchers and developers in the area. IWMMA 2013 has designated "Mathematical Models and its application in Spoken Dialogue Systems" as a special theme and has placed its focus on common issues of theories, applications, evaluation, limitations, general tools and techniques. The 2013 workshop program featured 17 scientific papers that were extended, revised and reviewed before publication in the VESTNIK journal.

In the following we provide an overview of the journal special issue contents. Ultes et al. introduce a review of the Interaction Quality paradigm for dialogue systems. Sidorov et al. presents methods for emotion recognition and speaker identification from speech. Gasanova, Sergienko et al. propose an algorithm for natural language classification and categorization, i. e. the call routing problem. Semenkina M. and Popov investigate a self-configuring genetic programming algorithm for the medical diagnostic problem. Semenkina O. et al. investigate a self-configuring evolutionary algorithm for the travelling salesman problem. Spirina et al. propose a two-step system in searching similar words for fast and reliable automatic concatenation of Russian sub-word units. Zaykovskiy presents results of distributed speech recognition systems. Shablov and Seminkin introduce intelligent information technologies in time series forecasting. Brester demonstrates how multicriteria evolutionary algorithms may be used for neural networks design. Akhmedova investigates new optimization metaheuristic based on co-operation of biology related algorithms. Khritonenko presents distributed self-configuring evolutionary algorithms for artificial neural networks design. Stanonov proposes self-adjusted evolutionary algorithms based approach for the automated design of fuzzy logic systems. Volkova introduces informative attribute selection with a hybrid self-adjusted evolutionary optimization algorithm. Strelnikov provides a presentation about an active system model. Finally, Ryzhikov presents performance improvement of a technique for evolutionary strategies applied to and indirect method for optimal control and automatic linear differential equation identification in analytical form.

We are convinced that mathematicians, computer scientists, engineers, and others who work in the area of mathematical modeling, no matter if in academia or in industry, may find the journal papers interesting and useful to their own work. We would like to thank the many people who contributed one way or another to the IWMMA 2013 workshop and the paper review. In particular, we would like to express our gratitude to Voroshilova Anna, Fibikh Ekaterina, Panfilov Ilya and Lipinskiy Leonid from the Siberian State Aerospace University, Maxim Sidorov and Stefan Ultes from Ulm University.

Wolfgang Minker, IWMMA'13 Program Committee Co-Chair

Roman Sergienko, IWMMA'13 Program Committee Member

УДК 519.8

NEW OPTIMIZATION METAHEURISTIC BASED ON CO-OPERATION OF BIOLOGY RELATED ALGORITHMS

Sh. A. Akhmedova, E. S. Semenkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: shahnaz@inbox.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

In this paper we describe and investigate a new self-tuning metaheuristic approach called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA) based on five well-known nature-inspired optimization methods such as Particle Swarm Optimization, Wolf Pack Search, Firefly Algorithm, Bat Algorithm and Cuckoo Search Algorithm. Besides, two modifications of COBRA are introduced. Also new metaheuristic was used for adjustment of neural network's weight coefficients for solving different classification problems.

Keywords: nature-inspired algorithms, self-tuning, neural networks, classification.

НОВЫЙ КОЛЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ КООПЕРАЦИИ БИОНИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Ш. А. Ахмедова, Е. С. Семенкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shahnaz@inbox.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

Описывается и рассматривается новый самонастраивающийся коллективный подход, названный кооперацией бионических алгоритмов (COBRA), основанный на пяти хорошо известных бионических алгоритмах: стайные алгоритмы, алгоритмы волчьих стай, мотыльковые алгоритмы, поиск алгоритмом «кукушки». Кроме того, включены две модификации алгоритма COBRA. Также новый коллективный метод используется для настройки весовых коэффициентов нейронной сети в решении различных задач классификации.

Ключевые слова: бионический алгоритм, самонастройка, нейронная сеть, классификация.

Existing metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization or Firefly Algorithm, for example, start to demonstrate their power in dealing with tough optimization problems and even NP-hard problems. Five well-known and very similar to each other nature-inspired algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO) [1], Wolf Pack Search (WPS) [2], Firefly Algorithm (FFA) [3], Cuckoo Search Algorithm (CSA) [4] and Bat Algorithm (BA) [5] were investigated by authors of this paper. Each of above listed algorithms was originally developed for solving real-parameter unconstrained optimization problems and imitates a nature process or the behavior of an animal group. For instance Bat Algorithm is based on the echolocation behavior of bats; Cuckoo Search Algorithm was inspired by the obligate brood parasitism of some cuckoo species by laying their eggs in the nests of other host birds (of other species), and so on.

Unconstrained optimization. Various test unconstrained optimization problems with various dimensions were used for the preliminary investigation of all mentioned algorithms: Rosenbrock's function, Sphere function, Ackley's function, Griewank's function, Hyper-Ellipsoidal function and Rastrigin's functions [6]. The comparison of obtained results showed that we can't say which approach is the most appropriate for any function and any dimension. The best results were obtained by

different methods for different problems and for different dimensions; in some cases the best algorithm differs even for the same test problem if the dimension varies. Each strategy has its advantages and disadvantages, so a natural question is whether it is possible to combine major advantages of above listed algorithms and try to develop a potentially better algorithm?

These observations brought researchers to the idea of formulating a new metaheuristic approach that combines major advantages of various algorithms. So a new optimization method based on PSO, WPS, FFA, CSA and BA was implemented and investigated. Proposed approach was called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA). Its basic idea consists in generating five populations (one population for each algorithm) which are then executed in parallel cooperating with each other (so-called island model).

Proposed algorithm is a self-tuning meta-heuristic. That is why there is no necessity to choose the population size for each algorithm. The number of individuals in each algorithm's population can increase or decrease depending on the fact whether the fitness value improving on current stage or not. If the fitness value wasn't improved during a given number of generations, then the size of all populations increases. And vice versa, if the fitness value was constantly improved, then the size of all populations de-

creases. Besides, each population can “grow” by accepting individuals removed from other population. Population “grows” only if its average fitness is better than the average fitness of all others populations. Thereby we can determine “winner algorithm” on each iteration/generation. The result of this kind of competition allows presenting the biggest resource (population size) to the most appropriate (in the current generation) algorithm. This property can be very useful in case of a hard optimization problem when, as it is known, could be no single best algorithm on all stages of the optimization process execution.

The most important driving force of the suggested meta-heuristic is the migration operator that creates a co-operation environment for component algorithms. All populations communicate with each other: they exchange individuals in such a way that a part of the worst individuals of each population is replaced by the best individuals of other populations. It brings up to date information on the best achievements to all component algorithms and prevents their preliminary convergence to its own local optimum that improves the group performance of all algorithms.

For better understanding whether COBRA is workable and useful following experiments were conducted. First of all, the same six test problems by proposed algorithm were solved; it demonstrates comparative performance (table 1).

Additional observation was that COBRA outperformed component algorithms in a number of cases and this number increases with the problem dimension.

Next experiment was conducted in following way. All five original algorithms were compared with the new algorithm COBRA on 28 test functions from [7] following experiments settings described there. Problem dimensions used for comparing were 2, 3, 5, 10, 30. For each problem, “winner algorithm” was established by two criteria – algorithm given the overall best result (“best”) and algorithm demonstrated the best mean result averaged over 51 runs (“mean”). Again it was observed that number of “wins” for COBRA by both criteria increases with the problem dimension. For the criterion “best” COBRA has 7 wins on the test problems of the dimension 2, 11 wins when dimension was 5 and 26 wins when dimension was 30. Number of wins for the criterion “mean” were, accordingly, 19, 24 and 28. Algorithms competition results for dimensions 10 and 30 are presented in table 2 below where table cells contain the name of winning algorithm.

So numerical experiments and comparison showed that COBRA is superior to its component algorithms (PSO, WPS, FFA, CSA, BA) when dimension grows and more complicated problems are solved. It means that the new algorithm should be used instead of components algorithm when the optimization problem dimension is high and optimizes function properties are complicated.

Table 1

Results obtained by COBRA for the first six test problems

Func	Dimension	Success rate	Average population size	Average number of function evaluations	Average function value	STD
1	2	100	20	263	0.000652238	0.000346687
	3	100	24	605	0.000750922	0.000290652
	4	100	27	757	0.000790054	0.000297926
2	2	100	20	284	0.000753919	0.000272061
	3	100	22	552	0.000783528	0.000290029
	4	100	27	932	0.000817905	0.00028088
3	2	100	29	867	0.000588745	0.000307145
	3	100	33	1470	0.000774339	0.000282613
	4	100	32	1604	0.000739637	0.000372214
4	2	100	20	202	0.000678884	0.000320224
	3	100	25	581	0.000749783	0.000282332
	4	100	28	1085	0.000756105	0.000286405
5	2	100	22	369	0.000806724	0.000140685
	3	100	22	574	0.000989866	0.00140048
	4	100	28	885	0.000695163	0.000159342
6	2	100	27	860	180.001	0.000273844
	3	100	40	2082	170.001	0.000247725
	4	100	56	3877	160.001	0.000336504

Table 2

Performance comparison of COBRA and component algorithms (28 test functions from [7])

Func	Best D = 10	Mean D = 10	Best D = 30	Mean D = 30
1	PSO	PSO	PSO	COBRA
2	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
3	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
4	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
5	PSO	PSO	WPS	COBRA
6	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
7	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
8	WPS	COBRA	COBRA	COBRA
9	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
10	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
11	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
12	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
13	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
14	WPS	COBRA	COBRA	COBRA
15	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
16	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
17	PSO	COBRA	COBRA	COBRA
18	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
19	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
20	WPS	COBRA	COBRA	COBRA
21	PSO	COBRA	COBRA	COBRA
22	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
23	WPS	COBRA	COBRA	COBRA
24	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
25	FFA	COBRA	COBRA	COBRA
26	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
27	COBRA	COBRA	COBRA	COBRA
28	PSO	COBRA	COBRA	COBRA

Constrained optimization. Next step in our study was about development and investigation a modification of COBRA that can be used for solving constrained real-parameter optimization problems. For these purpose three constraint handling methods were used: dynamic penalties [8], Deb's rule [9] and technique that was described in [10]. Method proposed in [10] was implemented to PSO-component of COBRA; at the same time other components were modified by implementing firstly Deb's rule and then calculating function values by using dynamic penalties. The performance of the proposed algorithm was evaluated on the set of 18 scalable benchmark functions provided for the CEC 2010 competition and special session on single objective constrained real-parameter optimization [11], when the dimension of decision variables is set to 10 and 30, respectively. For each function 25 runs are performed. A maximum function evaluation was 200000 for dimension 10 and 600000 for dimension 30. Obtained results are presented in table 3 and table 4.

Constrained modification of COBRA was compared with algorithms that took part in competition CEC 2010. Finally it was established that proposed approach is superior to 3–4 of 14 methods from this competition. Besides, COBRA outperforms all its component algorithms.

On COBRA effectiveness in binary space. As it was mentioned, all above described algorithms was originally developed for continuous valued spaces. However many applied problems are defined in discrete valued spaces where the domain of the variables is finite. For this purpose binary modification of COBRA was developed. COBRA was adapted to search in binary spaces by applying a sigmoid transformation to the velocity component (PSO, BA) and coordinates (FFA, CSA, WPS) to squash them into a range [0, 1] and force the component values of the positions of the particles to be 0's or 1's. The sigmoid expression is given in [12].

Table 3

Results obtained by constrained modification of COBRA for dimension D = 10

Func	Best	Worst	Mean	STD	Feasibility Rate
1	-0.727373	-0.559235	-0.637199	0.0594299	100
2	1.82813	4.34865	2.75755	0.926259	100
3	8.87653	8.89164	8.87895	0.00318718	92
4	5.57793	5.58908	5.58215	0.00312711	28
5	189.952	516.713	338.063	82.963	32
6	103.515	563.247	369.431	72.4124	24
7	0.529035	0.888604	0.566389	0.0676125	100
8	21.8649	53.8881	23.4468	6.23478	100
9	1.9133e+012	2.4654e+012	2.04001e+012	2.12584e+012	68
10	2.30765e+011	2.84432e+012	6.58941e+011	8.31906e+011	84
11	0.0002073305	0.00843533	0.00190705	0.000479151	68
12	-169.36	671.962	-102.82	228.253	0
13	-57.1851	-54.9831	-57.0463	0.429771	100
14	7.9878	1.72346e+007	6.97436e+006	8.37255e+006	100
15	6.9986e+009	4.94244e+011	7.56845e+010	1.22078e+011	100
16	0.724961	1.17519	0.826752	0.165962	56
17	103.275	321.092	111.988	42.6833	100
18	378.76	671.905	425.911	77.383	96

Table 4

Results obtained by constrained modification of COBRA for dimension D = 30

Func	Best	Worst	Mean	STD	Feasible rate
1	-0.625073	-0.270351	-0.42015	0.132247	100
2	4.0493	5.03476	4.57562	0.395698	92
3	28.6807	28.707	28.6861	0.00729205	36
4	9.13159	9.13525	9.13303	0.00120324	20
5	478.746	555.016	485.285	18.7327	40
6	493.301	600.586	504.521	25.1907	32
7	0.334309	4.23197	1.61077	1.30831	100
8	470.46	1023.44	896.351	220.978	100
9	2.63268e+012	7.38962e+012	3.12913e+012	1.05068e+012	56
10	1.25487e+012	3.94721e+012	1.96828e+012	5.87269e+011	44
11	-0.00825323	-0.00281327	-0.00443743	0.000266256	16
12	155.45	720.707	403.327	105.636	0
13	-64.3938	-53.8018	-58.2296	4.54096	100
14	398.499	2.90799e+007	1.24046e+006	5.68939e+006	100
15	4.93728e+009	4.92773e+012	2.14661e+012	1.80896e+012	100
16	1.15237	1.37727	1.19964	0.0478142	8
17	332.563	381.055	344.201	20.7101	92
18	290.033	357.092	355.187	13.2994	100

Table 5

Results obtained by binary modification of COBRA

Func	Dimension	Success rate	Average population size	Average number of function evaluations	Average function value	STD
1	2	100	31	740	0.000182069	0.000248506
	3	99	68	3473	0.000188191	0.000689647
	4	93	80	6730	0.00579879	0.0242297
2	2	100	27	567	0.000236274	0.000265351
	3	100	30	775	0.000150127	0.000168235
	4	100	32	916	0.000355086	0.00029257
3	2	100	32	1439	0.00019874	0.000330485
	3	91	51	2046	0.00150713	0.00245315
	4	83	62	3030	0.00126295	0.00281119
4	2	100	33	931	0.000209168	0.000268542
	3	100	32	868	0.000191162	0.000233884
	4	92	79	1710	0.000347666	0.000257291
5	2	100	30	899	0.00032841	0.000468681
	3	90	65	1332	0.000506847	0.00140048
	4	90	160	2258	0.00411721	0.158903
6	2	100	28	1734	180.0002	0.000185362
	3	98	36	3294	169.801	0.169149
	4	96	41	5462	159.2	0.279294

The same six problems (Rosenbrock's function, Sphere function, Ackley's function, Griewank's function, Hyper-Ellipsoidal function and Rastrigin's functions) were used for testing new algorithm; maximum number of function evaluations was equal to 100000. Obtained results are presented in table 5. Experiments showed that COBRA's binary modification works successfully and reliable but slower than original COBRA for the same problems with smaller success rate obtained. Such result was expected as the binary modification needs more computing efforts in continuous variables space and shouldn't be used instead of original COBRA. However, it can be recommend for solving optimization problems with binary representation of solutions.

New metaheuristic applications. COBRA was successfully used for the adjustment of neural network's weight coefficients for solving different classification problems such as bank scoring problems and medical diagnostic problems.

First two applied bank scoring problems were solved: bank scoring in Germany (20 attributes, 2 classes, 700 records of the creditworthy customers and 300 records for the non-creditworthy customers) and in Australia (14 attributes, 2 classes, 307 examples of the creditworthy customers and 383 examples for the non-creditworthy customers). Benchmark data were taken from [13]. For these two problems the structure of neural networks was fixed as a single hidden layer perceptron with 3 or 5 neurons, each having bipolar sigmoid as an activation function. From optimization view point, these problems have from

45 till 105 real-valued variables. Obtained results are presented in table 6 below where the portions of correctly classified instances from validation sets are presented. There are also results of other researchers used other approaches (as were found in scientific literature).

Then COBRA was used for adjustment of neural network's weight coefficients for solving medical diagnostic problems. Structure of neural networks was fixed as a single hidden layer perceptron with 3 or 5 neurons, each having bipolar sigmoid as an activation function. Also was used the network with three hidden layers with 3 neurons on each layer. Two applied problems were solved with developed network: Breast Cancer Wisconsin (11 attributes, 2 classes, 458 records of the patients with benign cancer and 241 records of the patients with malignant cancer) and Pima Indians Diabetes (9 attributes, 2 classes, 500 patients that were tested negative for diabetes and 268 patients that were tested positive for diabetes). Benchmark data were also taken from [13]. Obtained results are presented in table 7 and table 8 below where the portions of correctly classified instances from validation sets are presented. There are also results of other researchers used other approaches (as were found in scientific literature).

COBRA's binary modification for constrained optimization problems was successfully used in solving the investment allocation optimization problem for a machine building concern. This problem contains 50 binary variables and tens constraints. In all runs, the algorithm found the best known solution.

Conclusions. So in this paper the new meta-heuristic, called Co-Operation of Biology Related Algorithms (COBRA), based on five well-known nature-inspired algorithms such as Particle Swarm Optimization, Wolf Pack Search, Firefly Algorithm, Cuckoo Search algorithm and Bat Algorithm was introduced. New approach was developed for solving real-parameter unconstrained problems. Proposed algorithm is a self-tuning method, so one has no

need in controlling the population size while this is the most essential parameter for above listed component algorithms. In fact, one does not have to fine tune this parameter for a specific problem. Then proposed algorithm was validated and compared with its component algorithms. Simulations and comparison showed that COBRA is superior to these existing component algorithms when dimension grows and complicated problems are solved.

Table 6

Classifiers's performance comparison for bank scoring problems

Classifier	Scoring in Australia	Scoring in Germany
2SGP	0.9027	0.8015
C4.5	0.8986	0.7773
Fuzzy	0.8910	0.7940
GP	0.8889	0.7834
CART	0.8744	0.7565
LR	0.8696	0.7837
CCEL	0.8660	0.7460
RSM	0,8520	0,6770
Bagging	0.8470	0.6840
Bayesian	0.8470	0.6790
Boosting	0.7600	0.7000
k-NN	0.7150	0.7151
This study: ANN+COBRA (5)	0,8907	0,7829
This study: ANN+COBRA (3)	0,8898	0,7809

Table 7

Classification accuracies obtained with COBRA and other classifiers for breast cancer problem

Author (year)	Method	Classification accuracy (%)
Quinlan (1996)	C4.5	94.74
Hamiton et al. (1996)	RAIC	95.00
Ster and Dobnikar (1996)	LDA	96.80
Nauck and Kruse (1999)	NEFCLASS	95.06
Pena-Reyes and Sipper (1999)	Fuzzy-GA1	97.36
Setiono (2000)	Neuro-rule 2a	98.10
Albrecht et al. (2002)	LSA machine	98.80
Abonyi and Szeifert (2003)	SFC	95.57
Übeyli (2007)	SVM	99.54
Polat and Günes (2007)	LS-SVM	98.53
Guijarro-Berdias et al. (2007)	LLS	96.00
Akay (2009)	SVM-CFS	99.51
Karabatak and Cevdet-Ince (2009)	AR + NN	97.40
Peng et al. (2009)	CFW	99.50
A. Marciano-Cedeño, J. Quintanilla-Domínguez, D. Andina (2011)	AMMLP	99.26
This study (2013)	ANN+COBRA (3x1)	97.62
	ANN+COBRA (5x1)	97.67
	ANN+COBRA (3x3)	98.16

Classification accuracies obtained with COBRA and other classifiers for diabetes problem

Author (year)	Method	Classification accuracy (%)
Mehmet Recep Bozkurt ¹ , Nilüfer Yurtay, Ziyne Yılmaz ¹ , Cengiz Sertkaya (2012)	PNN	72.00
	LVQ	73.60
	FFN	68.80
	CFN	68.00
	DTDN	76.00
	TDN	66.80
	Gini	65.97
	AIS	68.80
H. Temurtas, N. Yumusak, F. Temurtas (2009)	MLNN with LM(10xFC)	79.62
	PNN (10xFC)	78.05
	MLNN with LM	82.37
	PNN	78.13
S. M. Kamruzzaman, Ahmed Ryadh Hasan (2005)	FCNN with PA	77.344
K. Kayaer., T. Yıldırım (2003)	GRNN	80.21
	MLNN with LM	77.08
L. Meng, P. Putten, H. Wang (2005)	AIRS	67.40
This study (2013)	ANN+COBRA (3x1)	79.65
	ANN+COBRA (5x1)	79.71
	ANN+COBRA (3x3)	79.83

After that COBRA was modified for solving real-parameter constrained problems. A set of scalable benchmark functions provided for the CEC 2010 competition and special session on single objective constrained real-parameter optimization was used for testing of a proposed method. As result its usefulness and workability were established. Besides, constrained modification was compared with algorithms from this competition and showed better results than some of them.

Also in this study binary modification of COBRA was formulated. COBRA was adapted to search in binary spaces by applying a sigmoid transformation. This method was originally proposed by Kennedy and Eberhart for PSO, but it can be used for other nature-inspired algorithms as well. Binary version of COBRA was validated and compared with real-parameter version of COBRA.

And the last, all implemented variants of new meta-heuristic were used for solving applied problems.

We should notice that in this study only original design of component algorithms was used having in mind the examination of our idea as such. Although some modifications of them are known that improve their performance. As this idea is useful in its simple implementation, we hope that further modifications will give also a positive effect. Among possible modifications are the use of improved version of component algorithms, the use of more sophisticated ways of algorithms cooperation, the including other meta-heuristics in cooperation, etc. Also this potentially powerful optimization strategy can easily be extended to study multi-objective optimization problems.

As about applications, we have already successfully used this algorithm for adjustment of neural network's weight coefficients for solving classification problems. COBRA was used for neural network's weight coefficients adjustment for solving two bank scoring problems (Australian and German) and two medical diagnostic

problems (Breast Cancer Wisconsin and Indians Diabetes). We used simple and small structures for network. Artificial neural network was fully connected and there were a lot of inputs, so we had to find optimal solutions for big dimension problems. But even with these simple structures ANN showed good results while solving problems. In the future we intend to modify the algorithm for tuning also neural network's structure. For this purpose we'll use binary modification of COBRA.

References

1. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. In Proceedings of International Conference on Neural networks IV. 1995. P. 1942–1948.
2. Chenguang Yang, Xuyan Tu and Jie Chen. Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search. In Proceedings of International Conference on Intelligent Pervasive Computing, IPC2007. 2007. P. 462–467.
3. Yang X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In Proceedings of 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications, SAGA 2209. 2009. P. 169–178.
4. Yang X. S., Deb S. Cuckoo Search via Levy flights. In Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBic2009. 2009. P. 210–214.
5. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In Proceedings of International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010), SCI 284. 2010. P. 65–74.
6. Molga M., Smutnicki Cz. Test functions for optimization need. 2005. 3 kwietnia.
7. Liang J. J., Qu B. Y., Suganthan P. N. and Hernandez-Diaz A. G. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2013 Special Session on Real-Parameter

Optimization. Zhengzhou University, Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou China, and Nanyang Technological University, Singapore. 2012.

8. Eiben A.E., Smith J.E. Introduction to evolutionary computation. Springer, Berlin, 2003.

9. Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer methods in applied mechanics and engineering, 186(2-4). 2000. P. 311–338.

10. Liang J. J., Shang Zhigang, Li Zhihui. Coevolutionary Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer. In Proceedings of Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2010. P. 1505–1512.

11. Mallipeddi R., Suganthan P. N. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2010 Competi-

tion on Constrained Real-Parameter Optimization. Nanyang Technological University, Singapore. 2009.

12. Kennedy J., Eberhart R. C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics 1997, Piscataway, NJ. 1997. P. 4104–4109.

13. Frank A., Asuncion, A. UCI Machine Learning Repository. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. Citing Internet sources available from: <<http://archive.ics.uci.edu/ml>>. 2010.

© Ахмедова III. А., Семенкин Е. С., 2013

УДК 519.87

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE GENETIC ALGORITHMS FOR NEURAL NETWORK MODELS MULTICRITERIA DESIGN*

C. Yu. Brester, E. S. Semenkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: abahachy@mail.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

In this paper modifications of single- and multi-objective genetic algorithms are described and testing results of these approaches are presented. The gist of the algorithms is the use of the self-adaptation idea leading to reducing of the expert significance for the algorithm setting and expanding of GAs' application capabilities. On the basis of offered methods the program system realizing the technique for neural network models design was developed. The effectiveness of all algorithms was investigated on a set of test problems.

Keywords: genetic algorithms, multicriteria optimization, self-adaptation, neural networks, classification.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

К. Ю. Брестер, Е. С. Семенкин

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: abahachy@mail.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

Рассматриваются модификации одно- и многокритериального генетических алгоритмов и представлены результаты численных исследований этих подходов. Преимущество разработанных методов заключается в использовании идеи самоадаптации, позволяющей отказаться от привлечения эксперта для настройки алгоритма и расширить возможности использования генетических алгоритмов. На основе предлагаемых подходов разработана программная система для проектирования нейросетевых моделей. Эффективность всех алгоритмов была исследована на тестовых задачах.

Ключевые слова: генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация, самоадаптация, нейронные сети, классификация.

* The study was supported by The Ministry of education and science of Russian Federation, project 14.B37.21.1521.

Nowadays genetic algorithms (GA) [1] are widely used for the intelligent information technologies design (specifically for the artificial neural networks (ANN) models design). This development became possible due to the self-adaptation technique allowing automatic choosing of a genetic operator type for the current problem during the algorithm execution. It led to reducing of the expert significance for the algorithm setting and expanding of GAs' application capabilities. The adaptive single-objective GA used in this study is described in Section 1.

Conventional GA is a procedure for solving one-criterion unconstrained optimization problems but most of real problems are multi-criterion ones. There are many multi-criteria GAs but they also need careful choice of their settings for the performance improvement. That is why many approaches to self-adaptation were offered here. Our approach to multi-criterion GAs self-adaptation will be described in Section 2.

ANN-models are exploited in different applications: data analysis systems, speech or images recognition and so on. In this connection it is interesting not only to determine network weight coefficients for solving any problem with sufficient accuracy but also to find a compact network structure which would allow saving end user's computing resources. In this case a mathematical model looks like a multi-criterion optimization problem (MOP) with two objective functions. Therefore it is reasonable to use a combination of GAs: a MOP-algorithm is applied for ANN-structure design and a conventional GA is applied for the search of ANN weighting coefficients, certainly both methods should be self-adaptive. In addition local search algorithms can be used at any stage to determine the found result more exactly. An approach to the design of ANN-based models and results of its application is presented in Section 3. In Conclusion section we shortly describe presented results and discuss the directions of future research.

Adaptive single-objective GA. The structure of a conventional GA involves well-known genetic operators: selection, crossover and mutation. There are three variants of selection: proportional, tournament and rank; three variants of crossover: one-point, two-point and uniform; three variants of mutation: weak, average and strong. The realized technique of the operator choice is based on the evaluation of application probabilities for all variants of operators.

In the first generation all variants of every genetic op-

erator have equal probabilities, i. e. $q_i^k = \frac{1}{n^k}$, where q_i^k is the application probability for the i -th variant of the k -th operator, n^k is the number of different variants of a certain genetic operator, $i, k = \overline{1, 3}$. Before the operator is applied it is necessary to raffle the application probabilities.

After each generation the probabilities are recalculated taking into account fitness of individuals which were generated by the given operator. The main idea was borrowed from Banzhaf's article [2] with the only difference: the variable named « $ratio_i^k$ » is a fitness sum of individuals generated with the i -th variant of the k -th operator.

Below there is a rule for probabilities q_i^k calculation:

$$q_i^k = \frac{0,2}{n^k} + 0,8 \cdot \frac{ratio_i^k}{scale^k},$$

where $scale^k = \sum_i ratio_i^k$. The first summand doesn't

allow any probability to be equal to zero (what makes all variants of operators available throughout all generations).

The effectiveness of this approach was investigated on a set of one-criterion unconstrained optimization problems and was compared with the effectiveness of a conventional GA. Equal amount of resources was allocated for all algorithms: 100 individuals and 100 generations. Results were averaged over 500 runs. On the basis of reliability values the number of cases in which the adaptive GA lost to the standard GA was fixed. The number of all genetic operators' combinations was 27. Table 1 contains testing results.

Thus results of the testing showed that the efficiency of an adaptive genetic algorithm is not lower than the efficiency of an "average" GA and is comparable with "best" GA in many cases. It means that our self-adaptive GA can be recommended to be used instead of conventional GA.

Multi-objective GA. It should be mentioned that in general a mathematical model of any problem includes a set of quality criteria and all of them should be taken into account.

In 1999 the method named Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) was discovered by Zitzler and Thietle [3].

Table 1

Testing results of an adaptive single-objective GA

№	Test function	The number of cases when an adaptive GA lost to a conventional GA
1	Rastrigin function	9
2	Rosenbrock function	4
3	Katkovnik function	3
4	Griewank function	4
5	Multiplicative potential function	0
6	Additive potential function	7
7	Rastrigin function (ravine function with rotated axis)	1
8	"Foxholes"	8

It is based on the Pareto's dominance idea. The solution of the multi-criterion optimization problem belongs to Pareto's set (PS), and any of these points cannot be preferred to any other point. Their representation in the criteria space is Pareto's front (PF). In SPEA non-dominated individuals are stored in the archive of a limited size named "an outer set". The outer set is upgraded during the algorithm execution and as a result we have an approximation of PS.

This paper is devoted to SPEA-modification based on self-adaptation idea. The effectiveness of SPEA and its adaptive analog is compared below.

In SPEA tournament selection is applied: individuals can be selected both from the current population and from the outer set. Therefore only crossover and mutation operators require adjustment (tuning or control) [4].

Mutation probability can be determined according to one of the rules suggested by Daridi [5]. In the realized program system the following rule was used:

$$p_m = \frac{1}{240} + \frac{0,11375}{2^t},$$

where t is the current generation number.

The self-configurable crossover operator is based on the co-evolution idea [6]: the population is divided into parts and each part is generated with a certain type of crossover. The size of the subpopulation depends on the «fitness» of the corresponding recombination operator. «Fitness» is proportional to the number of non-dominated individuals generated with a certain type of crossover and stored in the outer set. The more non-dominated individuals are generated with the given type of operator, the more resources it gets. In this context "resources" means the number of individuals in the subpopulation corresponding to a certain crossover type. In each T -th generation one-point, two-point and uniform recombinations are compared according to their "fitness" in pairs. "Penalty" is a parameter which denotes the amount of resources which the genetic operator with lower "fitness" gives the genetic operator with higher "fitness". Also decreasing of resources must be limited with a parameter named "social card". It is necessary to maintain genetic operators' diversity. Initially all types of genetic operators have equal amount of resources.

The fitness value of the i -th crossover operator is defined according to the following rule:

$$q_i = \sum_{l=0}^{T-1} \frac{T-l}{l+1} \cdot b_i,$$

where T is the adaptation interval, $k = 0$ corresponds to the latest generation in the adaptation interval; $k = 1$ corresponds to the previous generation, etc.; b_i is defined as following:

$$b_i = \frac{\frac{p_i}{|\bar{P}|}}{\frac{n_i}{N}},$$

where p_i is the number of individuals in the current "outer" set generated with the i -th type of crossover operator; $|\bar{P}|$ is the outer set size; n_i is the number of indi-

viduals in the current population generated with the i -th type of crossover, N is the population size.

The effectiveness of operators is compared in pairs in every T -th generation to redistribute resources on the basis of "fitness" values:

$$s_i = \begin{cases} 0, & \text{if } n_i \leq \text{social_card} \\ \text{int}\left(\frac{n_i - \text{social_card}}{n_i}\right), & \text{if } (n_i - h_i \cdot \text{penalty}) \leq \text{social_card}, \\ \text{penalty}, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

where s_i is the size of a resource given by the i -th algorithm to those which won; h_i is the number of losses of the i -th algorithm in paired comparisons; a *social_card* is the minimum allowable size of the population, a *penalty* is a fee size for defeated algorithms. The parameter *social_card* is introduced to maintain the diversity of operators; *penalty* – for the redistribution of resources.

Test problems [7] developed by the scientific community for the comparison of evolutionary algorithms were used to explore the efficiency of a "standard" SPEA and its adaptive analog suggested in this study. Below are presented some results of testing carried out on a set of multi-criterion problems with two objective functions.

The results of algorithms work were estimated with the IGD-metrics:

$$IGD(A, P^*) = \frac{\sum_{v \in P^*} d(v, A)}{|P^*|},$$

where P^* is a set of points uniformly distributed along the PF, v is the point of P^* , $d(v, A)$ is the minimum Euclidean distance between v and A , A is the approximate set of the PF.

In SPEA we have nine combinations of genetic operators' types and the testing was conducted for all of them. Results were averaged over thirty runs and estimated with the special IGD-metrics. The maximal number of function calculations was set to be 300 000 for every problem.

The analysis of testing results showed that the effectiveness of the adaptive SPEA was not lower than the effectiveness of the "average" SPEA. It means that on this set of test problems the maximal number of SPEA-modification defeats was equal to three (versus nine variants of settings).

Self-adaptation is an alternative to random choice of genetic operators or multiple runs of GA for each variant of settings.

Below there is figure reflecting the self-configuration process of crossover for one of test problems which were discussed above:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 + \frac{2}{|J_1|} \sum_{j \in J_1} h(y_j) \rightarrow \min, \\ f_2 = 1 - x_1^2 + \frac{2}{|J_2|} \sum_{j \in J_2} h(y_j) \rightarrow \min, \end{cases}$$

where $J_1 = \{j | j - \text{odd}, \quad 2 \leq j \leq n\}$

$$\text{и } J_2 = \{j | j - \text{even}, \quad 2 \leq j \leq n\},$$

$$y_j = x_j - \sin(6\pi x_1 + \frac{j\pi}{n}), \quad n = 30, \quad j = 2, \dots, n,$$

$$h(t) = \frac{|t|}{1 + e^{2|t|}}, \quad \bar{x} \in [0, 1] \cdot [-2, 2]^{n-1}.$$

The following parameters of GA were set: the size of population was equal to 500; the number of generations was equal to 600. The “penalty” was 10 and the «social card» was 50.

The study of «standard» SPEA showed that the best variant of crossover for the given problem is a two-point one.

Investigation of a self-configurable crossover operator demonstrated that after the competition in the first several generations the best type of recombination obtains more resources than others.

But not always there is an undisputed leader among variants of genetic operators. One-point, two-point and uniform crossover or only some of them often compete during the algorithm execution. In some generations one type of crossover has the highest «fitness» but in other generations – another one. A specific feature of self-configuration is the opportunity to apply more effective settings in the current generation.

Application of adaptive GAs for the ANN-design. So realized adaptive single- and multi-objective genetic algorithms were integrated into the program system used for neural networks design. As it was mentioned above an adaptive multi-objective GA was applied to find ANN-models according to the theory of Pareto’s optimality. On the one hand it is important to determine the model with the required accuracy and in this case a root mean square or relative error may be used. And on the other hand for saving computational resources it is necessary to find compact structures for ANNs (e. g., the number of neurons and connections between them). Therefore these two criteria were

taken into account for ANN-modeling. An adaptive single-objective GA was used to adjust weights for ANNs.

In SPEA structures of ANNs are represented with binary code according to the following rule. Previously the maximal number of hidden layers and the maximal number of neurons in the each layer are set. Activation functions of neurons are chosen from the finite set of functions (e. g., sinus, sigmoid, Heaviside function, linear function, hyperbolic tangent, triangular function and so on) which have index numbers. These index numbers are coded with the sequence of genes which compile a chromosome.

Weights for every ANN-structure also have a binary representation: it is a sequence of binary codes which correspond to certain weights.

The effectiveness of the realized approach was investigated on test problems called “German credits” and “Australian credits” (all samples were borrowed from the machine learning repository [8]). These credit data include the information about creditors: age, gender, marital status, credit history records, job, etc. on the basis of which the decision about credit approvals is made. The data include continuous and categorical variables.

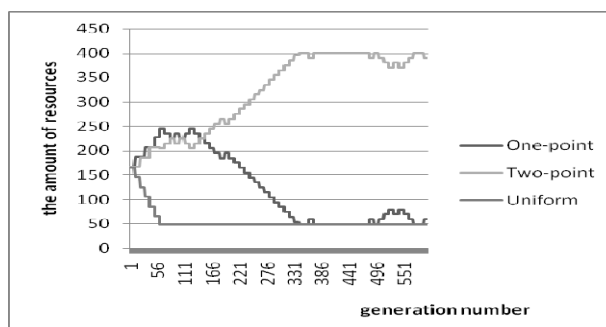
Involved samples contain 1000 and 690 examples respectively. These data sets were randomly divided into learning and test samples with proportion 80 to 20 %. The program system was launched with the following values of parameters: an adaptive SPEA had 20 generations and 50 individuals, an adaptive single-objective GA had 20 generations and 20 individuals, in the last generation of SPEA execution a single-objective GA had 100 generations and 100 individuals. After that the local search algorithm (Hooke-Jeeves search) was applied. The maximal number of hidden layers was 2 and the maximal number of neurons in the each layer was 10.

As a result approximations of Pareto’s set and front were defined for each problem. Table 3 contains found points of Pareto’s front.

Table 2

The adaptive SPEA’s testing results

Number of a test function	A value of IGD-metrics	The number of cases when the adaptive SPEA’s lost to a conventional SPEA
1	0,10579	2
2	0,04160	3
3	0,0049	1
4	0,04493	2
5	0,34105	2
6	0,0088	2
7	0,11738	1



Self-configurable crossover operator’s behavior for one of test problems

Table 3

Approximations of the Pareto's front for benchmark problems

Australian Credits			German Credits		
The number of neurons		Relative error	The number of neurons		Relative error
Layer 1	Layer 2		Layer 1	Layer 2	
8	7	0,093525	8	4	0,2200
7	6	0,107914	7	2	0,2250
6	6	0,115108	5	3	0,2350
4	6	0,129496	6	1	0,2550
			5	1	0,3000

Table 4

Results of alternative approaches

Method	Australian Credits (relative error)	German Credits (relative error)	Method	Australian Credits (relative error)	German Credits (relative error)
SCGP	0,0978	0,205	Bayesian approach	0,153	0,321
MGP	0,1015	0,2125	Boosting	0,24	0,3
2SGP	0,0973	0,1985	Bagging	0,153	0,316
GP	0,1111	0,2166	RSM	0,148	0,323
Fuzzy classifier	0,109	0,206	CCEL	0,134	0,254
C4.5	0,1014	0,2227	CART	0,1256	0,2435
LR	0,1304	0,2163	MLP	0,1014	0,2382

To estimate the found results we present the results of alternative approaches [9; 10]: two-stage genetic programming algorithm (2SGP), conventional genetic programming (GP), multilayered perceptron (MLP), classification and regression tree (CART), C4.5 decision trees, k nearest neighbors (k-NN), linear regression (LR), Bayesian approach, boosting, bagging, random subspace method (RSM), cooperative co evolution ensemble learning (CCEL).

But it should be understood that this comparison is approximate because of the absence of information about computational costs for the compared methods. Also the investigated approach allows finding several solutions taking into account some quality criteria and testing results of alternative approaches contain the information about only one solution (the best or average).

Conclusions. In this study we have presented two self-adaptive GAs, one for the one-criterion optimization and another one for the multi-criterion optimization, as well as their cooperation in automated design of ANN-based classifiers. Classifiers designed in this way are enough accurate and also have simple structures.

Directions of the future research can be divided into three groups. The first of them is the improvement of GAs self-adaptation abilities. The second direction is the modification of ANN-based models automated design through including different ANNs types (RBF, Hopfield-Tank, etc.). And the third is an expansion of adaptive GAs application areas, e.g., automated design of fuzzy systems, decision trees, etc.

References

1. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. MI: University of Michigan Press, 1975.
2. Niehaus J., Banzhaf W. Adaption of Operator Probabilities in Genetic Programming. Proceedings of the

4th European Conference on Genetic Programming, Lecture Notes In Computer Science, vol. 2038. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2001, p 325–336.

3. Zitzler E., Thietle L. Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 3, no. 4, November 1999.

4. Eiben A. E., Hinterding R., and Michalewicz Z. Parameter control in evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(2):124–141, 1999.

5. Daridi F., Kharm N., Salik J. F. N. Parameterless Genetic Algorithms: Review and Innovation. *IEEE Canadian Review*, no. 47, Summer 2004.

6. Sergienko R., Semenkin E. Competitive Cooperation for Strategy Adaptation in Coevolutionary Genetic Algorithm for Constrained Optimization *Proc. of 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, p. 1626-1631, 2010

7. Zhang Q., Zhou A., Zhao S., Suganthan P. N., Liu W., Tiwari S. Multi-objective optimization test instances for the CEC 2009 special session and competition. University of Essex and Nanyang Technological University, Tech. Rep. CES-487, 2008.

8. UCI Machine Learning Repository: Data Sets. Available at: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>.

9. Huang J.-J., Tzeng G.-H., Ong Ch.-Sh. Two-stage genetic programming (2SGP) for the credit scoring model. *Applied Mathematics and Computation*, 174 (2006): 1039–1053.

10. Sergienko R., Semenkin E., Bukhtoyarov V. Michigan and Pittsburgh Methods Combining for Fuzzy Classifier Generating with Coevolutionary Algorithm for Strategy Adaptation. In: 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011), June 5–8, 2011, New Orleans, LA.

© Брестер К. Ю., Семенкин Е. С., 2013

УДК 004.93

TEXT CATEGORIZATION BY COEVOLUTIONARY GENETIC ALGORITHM

T. O. Gasanova¹, R. B. Sergienko¹, W. Minker¹, E. S. Semenko²

¹Ulm University

43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany

E-mail: taniagasanova@yandex.ru, romaserg@list.ru, wolfgang.minker@uni-ulm.de

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru

In this paper we propose a model of text categorization, which combines a word clustering algorithm with coevolutionary genetic algorithm. Clustering is used in order to reduce the feature space dimension and genetic algorithm optimizes parameters of the model. The proposed method can be applied in large-scale information retrieval and data mining problems and it can be easily transportable to different domains and different languages since our approach does not require any domain-related or linguistic information. The performance on the data from the text-mining campaign DEFT'08 shows that the proposed method can compete with existing information retrieval models.

Keywords: text categorization, term relevance estimation, clustering, coevolutionary algorithm.

КАТЕГОРИЗАЦИЯ ДОКУМЕНТОВ КОЭВОЛЮЦИОННЫМ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ

Т. О. Гасанова¹, Р. Б. Сергиенко¹, В. Минкер¹, Е. С. Семенкин²

¹Ульмский Университет

Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна, 43

E-mail: taniagasanova@yandex.ru, romaserg@list.ru, wolfgang.minker@uni-ulm.de

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru

Предлагается модель категоризации документов, которая комбинирует алгоритм кластеризации слов и коэволюционный генетический алгоритм. Кластеризация используется для сокращения признакового пространства, а генетический алгоритм для оптимизации параметров модели. Предложенный метод был применен для задач извлечения информации и анализа данных высокой размерности и может быть без затруднений адаптирован для решения задач из различных предметных областей на различных языках, так как наш подход не требует дополнительной предметной или лингвистической информации. Показана эффективность на задачах DEFT'08 в сравнении с существующими моделями извлечения информации.

Ключевые слова: категоризация документов, оценка релевантности термов, кластеризация, коэволюционный алгоритм.

Nowadays, Internet and the World Wide Web generate a huge amount of textual information. It is increasingly important to develop methods of text processing such as text categorization. Text categorization can be considered to be a part of natural language understanding, where there is a set of predefined categories and the task is to automatically assign new documents to one of these categories. There are many approaches to the analysis and categorization of text, but they could be roughly divided into statistical approaches, rule-based approaches and their combinations. Furthermore, the method of text preprocessing and text representation influences the results that we obtained even with the same methods.

Related work was done by the participants of the fourth edition DEFT text mining campaign [1–8], which have worked with the same data using some classic ap-

proaches for text categorization and combinations of standard algorithms with the original ideas.

The challenge of 2008 year involves the articles classification by genre and category. This paper reports on the results obtained using only the second task of the campaign and focuses on detecting the category, however articles are still from two sources: Le Monde (a French daily newspaper), and Wikipedia. Articles from this task are divided into five categories: France, International, Literature, Science, Society and are labeled by experts.

The proposed approach consists of preprocessing step, when we extract all words from the train set regardless of the case of the letters and excluding the punctuation. Then using our formula for word relevance estimation and applying hierarchical clustering algorithm we obtain a set of clusters and assign a common value to the whole cluster. However these common values do not provide the maxi-

imum classification quality, and therefore we suggest using hybrid genetic algorithm to improve the values corresponding to a single category and coevolutionary genetic algorithm with cooperation scheme [9] to improve all values in parallel.

Genetic algorithms are well-known and widely used methods of global optimization since they make no assumptions about the problem being optimized; they can work with algorithmically defined criteria on the binary, real, nominal, mixed etc. data types, they search in parallel in different regions of the feature space. To provide local convergence genetic algorithms are often hybridized with methods of local optimization. Due to these features in our approach genetic algorithms combined with local search have been chosen as an optimization tool. In order to improve the accuracy rate using all words we propose a coevolutionary genetic algorithm where individual algorithms do not compete with each other, but exchange the information between subpopulations.

This paper is organized as follows: Section 2 describes the task and the DEFT'08 corpora. Section 3 explains our approach. In Section 4 we discuss our experimental results in comparison with results observed by DEFT participants. Finally, we draw some conclusions and discuss future research directions in Section 5.

Problem Description. The data for testing of DEFT 2008 edition is related to the text classification by categories and genres. The data consists of two corpora containing articles of two genres: articles extracted from French daily newspaper *Le Monde* and encyclopedic articles from Wikipedia in French language.

In this paper we use the second database, focusing on detecting the category, but nevertheless with the two types of documents. The given database is divided into five common categories: France (FRA), International (INT), Literature (LIV), Science (SCI), and Society (SOC). The data is divided into train (60 % of the whole number of articles) and test set (40 %). The main difficulty of the given database is that the articles in every category are written in two different genres. To apply our algorithms we extracted all words which appear in train set regardless of the letter case and we also excluded dots, commas and other punctual signs. At the end we obtained 262400 words which we enumerated and each article is represented as the list of word numbers. We have not used any additional filtering as excluding the stop or ignore words.

The initial database has been preprocessed to be a binary matrix with rows representing utterances and columns representing the words from the vocabulary. An element from this binary matrix, a_{ij} , equals to 1 if in utterance i the word j appears and equals to 0 if it does not appear.

Utterance duplicates were removed. The preprocessed database consisting of 24458 utterances was divided into train (22 020 utterances, 90,032 %) and test set (2438 utterances, 9,968 %) such that the percentage of classes remained the same in both sets. The size of the dictionary of the whole database is 3464 words, 3294 words appear in training set, 1124 words appear in test set, 170 words which appear only in test set and do not appear in training

set (unknown words), 33 utterances consisted of only unknown words, and 160 utterances included at least one unknown word.

The Proposed Approach. The aim of this work is to develop algorithms which are able to solve the given task without extra knowledge related to domain or language and nevertheless the method should provide good classification quality in comparison with the participants of DEFT'08.

The idea is that every word that appears in the article has to contribute some value to the certain class and the class with the biggest value we define as a winner for this article. For each term we assign a real number term relevance that depends on the relative frequency of the word occurrence. Term relevance is calculated using a modified formula of fuzzy rules relevance estimation for fuzzy classifier [10]. Membership function has been replaced by word frequency in the current class.

Let L be the number of classes; n_i is the number of articles of the i^{th} class; N_{ji} is the number of j^{th} word occurrence in all articles of the i^{th} class; $T_{ji} = \frac{N_{ji}}{n_i}$ is the relative frequency of j^{th} word occurrence in the i^{th} class.

$R_j = \max_i T_{ji}$, $S_j = \arg(\max_i T_{ji})$, where S_j is the number of class which we assign to j^{th} word. The term relevance, C_j , is given by

$$C_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^L T_{ji}} (R_j - \frac{1}{L-1} \sum_{i=1, i \neq S_j}^L T_{ji}).$$

C_j is higher if the word occurs often in few classes than if it appears in many classes. In our approach as a decision rule: for the given article we calculate the values A_i (for each i^{th} class): $A_i = \sum_{j: S_j=i} C_j$.

Then we find the number of class which achieves maximum of A_i . The results are shown in table 1.

The average F-score obtained by DEFT'08 participants on the test data was 81.1 and ours reached only 80.26. In the next Sections we describe some ways to improve our results.

Word Clustering. Over 250 000 words have been extracted from the train data. For each word we assigned the C value and the number of class where it contributes. Due to the size of the dictionary it is time consuming and nontrivial to directly apply any optimization method. Therefore we suggest to preprocess our dictionary in the way that words that have equal or similar C values be in the same cluster and one common C value will be assigned to all words from this cluster. It should be mentioned that our preprocessing stage does not use any specific linguistic information, expert knowledge or domain related information. Therefore it can be easily transportable to the data from another domain or even in another language.

In the table 2 we show how dramatically the size of dictionary decreases if we combine only words which have identical C values which mean that there is no difference between them in terms of our approach.

Table 1

Precision, Recall and F-score obtained by using C-values to estimate the word relevance

	Precision	Recall	F-score	Accuracy
Train set	91,4912	89,5783	90,5246	90,9045
Test set	82,5306	78,1136	80,2614	80,6347

Table 2

Total number of words and number of words with unique C values per category

Category	Number of words	Number of words with unique C values
France	29145	5192
International	46102	7238
Literature	65919	8068
Science	80412	5760
Society	40822	4793
Total	262400	31051

However from the Table 2 one can see that the number of clusters is still too large and in order to reduce the dictionary size we take hierarchical agglomerative clustering

As a common C value of the cluster we calculate the arithmetic mean of all word C values from this cluster. To choose which clusters are joint on the current step we calculate all distances between clusters:

$$dist(X, Y) = \frac{1}{N} \frac{1}{M} \sum_i \sum_j \|X_i - Y_j\|, \text{ where } N \text{ is the number of words in cluster } X \text{ and } M \text{ is the number of words in cluster } Y; \text{ and we unite the closest clusters.}$$

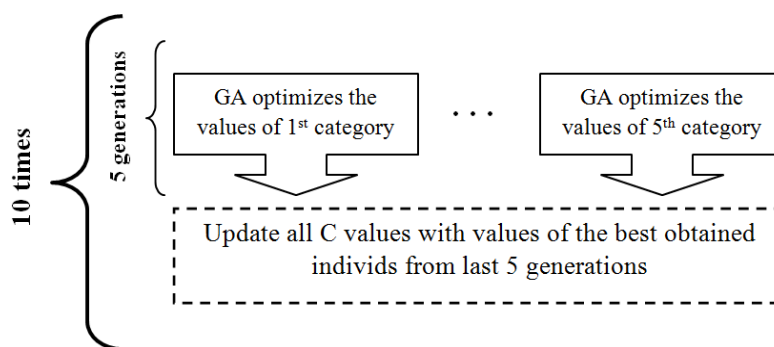
Genetic Algorithm. After we clustered words in the dictionary there is a hierarchical tree for each category and assigned values to all clusters. The question if these values are global optimum remains open. There is no evidence that the current values are even a local maximum of classification quality function.

To optimize C values when there is a predefined set of clusters for the certain category we suggest to apply genetic algorithm hybridized with local search due to its relative simplicity and global convergence, and it does not require any a priori information about behavior of the classification quality function.

In this work we apply a local search algorithm only to the best obtained individual to make sure that it reaches at least a local maximum. The C values of other categories are fixed and only the C values of the current class are being optimized. Each individual represents C values for the current category encoded to a binary string. As a fitness function we use the F-score on train set calculated with the fixed C values and C values of the individual.

Coevolutionary Genetic Algorithm. In order to take advantage of all C values improvement we propose to apply cooperative coevolutionary genetic algorithm with local search. The main stages of applied method are shown in figure.

On the first phase all individual genetic algorithms work separately (for each of them other C values are fixed and the task is to optimize C values which belong to the corresponding class), the length of this phase defines how many generations individual algorithms can work without information exchange. Then we stop all separate algorithms and update all C values which have been obtained by the best individuals of all algorithms. We repeat these two stages until we reach the maximum number of generations.

Coevolutionary genetic algorithm for C values optimization

This variant of coevolutionary algorithm uses cooperative scheme in order to achieve higher performance than each individual algorithm, in this case subpopulations do not exchange individuals, only information that influences the fitness function calculation.

Experimental Results. After the The DEFT (“Défi Fouille de Texte”) Evaluation Package has been used for algorithms application and results comparison. In order to evaluate obtained results with the campaign participants we have to use the same measure of classification quality: precision, recall and F-score.

Precision for each class i is calculated as the number of correctly classified articles for class i divided by the number of all articles which algorithm assigned for this class. Recall is the number of correctly classified articles for class i divided by the number of articles that should have been in this class. Overall precision and recall are calculated as the arithmetic mean of the precisions and recalls for all classes (macro-average). F-score is calculated as the harmonic mean of precision and recall.

First, we present our results obtained by hybrid genetic algorithm with 200 individuals and 200 generations, tournament selection (tournament size: 3), weak mutation, uniform crossover (table 3).

From the table 3 one can see that words from the category SOC influence more on the classification quality than words which belong to other classes and with the results of category INT and SOC we achieve better performance than the average result of participants.

Finally, Table 4 provides results obtained by coevolutionary algorithm with different number of clusters.

From the Table 4 one can conclude that with clusters number from 40 to 70 we achieve F-scores which outperform the average results of the DEFT’08 participants. The best obtained F-score on the test data achieved with 60 clusters and then if we increase the clusters number we will see decreasing of the classification quality.

Conclusion and Future Directions. In this paper we present how hybrid genetic algorithms can improve the classification quality in term of precision, recall, F-score and accuracy. To reduce the feature space dimension we applied the hierarchical agglomerative clustering using the alternative formula for word relevance estimation which gives better results on the given data than the simple relative frequency. This approach has been applied for the corpora from DEFT’08 and it can compete with the results of campaign participants despite that the method does not use any linguistic or domain related information.

The obtained results are promising, however the methods require more investigation, e. g. there were no experiments with different number of clusters for each category. Our next step will be to design an automatic method that optimizes the number of clusters for each class. Future work also involves applying our method to detect genre and category in the first task of the database.

Table 3

Results of genetic algorithm application for each class (averaged by 50 runs)

Class	FRA	INT	LIV	SCI	SOC
Test set	80,4053	82,0047	80,7685	80,6156	84,4262
Train set	91,4055	93,1635	91,7792	91,3461	94,0594

Table 4

Results of coevolutionary genetic algorithm application with different clusters number for each category

Number of clusters for each category	Train set	Test set
10	93,5851	84,063
20	93,5244	84,3051
30	93,4268	84,3688
40	93,6178	84,4644
50	93,7986	84,591
60	94,0533	84,925
70	93,5512	84,4979

References

1. Bechet F., Beze M. E., Torres-Moreno J.-M. 2008. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8-13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, p. 27–36.
2. Charnois T., Doucet A., Mathet Y., Rioult F. 2008.

Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, p. 37–46.

3. Charton E., Camelin N., Acuna-Agost R., Gotab P., Lavalley R., Kessler R., Fernandez S. 2008. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, p. 47–56.

4. Cleuziou G., Poudat C. 2008. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8-13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, p. 57–64.
 5. DEFT (Défi Fouille de Textes) <http://deft.limsi.fr/>.
 6. European Language Recourses Association. DEFT'08 Evaluation Package http://catalog.elra.info/product_info.php?cPath=42_43&products_id=1165.
 7. Plantie M., Roche M. and Dray G. 2008. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, 65–74.
 8. Trinh A.-P., Buffoni D., Gallinari P. 2008. Proceedings of the 4th DEFT Workshop (Avignon, France, June 8–13, 2008). DEFT '08. TALN, Avignon, France, p. 75–86.
 9. Potter M. A., De Jong K. A. 2000. Cooperative co-evolution: an architecture for evolving coadapted sub-components. Trans. Evolutionary Computation, 8 (Jan. 2000), p. 1–29.
 10. Ishibuchi H., Nakashima T. and Murata T. 1999. Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 29, p. 601–618.
- © Гасанова Т. О., Сергиенко Р. Б.,
Минкер В., Семенкин Е. С., 2013

УДК 004.93

A NEW METHOD FOR NATURAL LANGUAGE CALL ROUTING PROBLEM SOLVING

T. O. Gasanova¹, R. B. Sergienko¹, W. Minker¹, E. A. Zhukov²

¹Ulm University

43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany

E-mail: taniagasanova@yandex.ru, romaserg@list.ru, wolfgang.minker@uni-ulm.de

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: zhukov.krsk@gmail.com

Natural Language call routing remains a complex and challenging research area in machine intelligence and language understanding. This paper is in the area of classifying user utterances into different categories. The focus is on design of algorithm that combines supervised and unsupervised learning models in order to improve classification quality. We have shown that the proposed approach is able to outperform existing methods on a large dataset and do not require morphological and stop-word filtering. In this paper we present a new formula for term relevance estimation, which is a modification of fuzzy rules relevance estimation for fuzzy classifier. We propose to split the classification task into two steps: 1) “garbage” class identification; 2) further classification into meaningful classes. The performance of the proposed algorithm is compared to several standard classification algorithms on the database without the “garbage” class and found to outperform them with the accuracy rate of 85,55 %. Combination of our approach with 9-NN algorithm for two-stage classification problem definition provides the accuracy rate of 77,11 % for test sample at whole.

Keywords: call classification, term relevance estimation, natural language processing.

НОВЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ВЫЗОВОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

Т. О. Гасанова¹, Р. Б. Сергиенко¹, В. Минкер¹, Е. А. Жуков²

¹Ульмский Университет

Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна, 43.

E-mail: taniagasanova@yandex.ru, romaserg@list.ru, wolfgang.minker@uni-ulm.de

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: zhukov.krsk@gmail.com

Маршрутизация вызовов, основанная на обработке естественного языка, представляет собой сложную и перспективную область исследований в интеллектуальных машинных методах и интерпретации языка. Рассмотрена категоризация пользовательских заявок. Сделан акцент на комбинировании технологий машинного обучения с учителем и без учителя в целях повышения точности классификации. Показано, что разработанный подход способен превзойти существующие алгоритмы на больших базах данных и не требующих морфологического анализа или фильтра в виде «стоп-слова». В предлагаемом подходе осуществляется декомпозиция задачи классификации, к которой сводится маршрутизация вызовов, на две стадии: обнаружение «мусорного» класса и отнесение объектов к значимым классам. Предлагается новая формула оценки релевантности термов при определении значимых классов, которая является модификацией оценки релевантности нечетких

правил в нечетком классификаторе. Используя эту формулу только для 300 наиболее часто встречающихся слов для каждого класса, мы достигли точности классификации 85,55 % при исключении элементов неинформативного класса. Комбинирование предлагаемого подхода с методом ближайших соседей в двухступенчатой постановке задачи обеспечивает точность классификации 77,11 % на всей тестовой выборке.

Ключевые слова: классификация вызовов, оценка релевантности термов, обработка естественного языка.

Natural language call routing can be treated as an instance of topic categorization of documents (where the collection of labeled documents is used for training and the problem is to classify the remaining set of unlabeled test documents) but it also has some differences. For instance, in document classification there are much more terms in one object than in single utterance from call routing task, where even one-word utterances are common.

A number of works have recently been published on natural language call classification. B. Carpenter, J. Chu-Carroll, C.-H. Lee and H.-K. Kuo [1; 2] proposed approaches using a vector-based information retrieval technique, the algorithms designed by A. L. Gorin, G. Riccardi, and J. H. Wright [3] use a probabilistic model with salient phrases. R. E. Schapire and Y. Singer [4] focused on a boosting-based system for text categorization.

The most similar work has been done by A. Albalade, D. Suendermann, R. Pieraccini, A. Suchindranath, S. Rhinow, J. Liscombe, K. Dayanidhi, and W. Minker [5–9]. They have worked on the data with the same structure: the focus was on the problem of big part of non-labeled data and only few labeled utterances for each class, methods of matching the obtained clusters and the given classes have also been considered; they provided the comparison of several classification methods that are able to perform on the large scale data.

The information retrieval approach for call routing is based on the training of the routing matrix, which is formed by statistics of appearances of words and phrases in a training set (usually after morphological and stop-word filtering). The new caller request is represented as a feature vector and is routed to the most similar destination vector. The most commonly used similarity criterion is the cosine similarity. The performance of systems, based on this approach, often depends on the quality of the destination vectors.

In this paper we propose a new term relevance estimation approach based on fuzzy rules relevance for fuzzy classifier [10] to improve routing accuracy. We have also used a decision rule different from the cosine similarity. We assign relevancies to every destination (class), calculate the sums of relevancies of words from the current utterance and choose the destination with the highest sum.

The database for training and performance evaluation consists of about 300.000 user utterances recorded from caller interactions with commercial automated agents. The utterances were manually transcribed and classified into 20 classes (call reasons), such as *appointments*, *operator*, *bill*, *internet*, *phone* or *video*. Calls that cannot be routed certainly to one reason of the list are classified to class *_TE_NOMATCH*.

A significant part of the database (about 27 %) consists of utterances from the “garbage” class (*_TE_NOMATCH*). Our proposed approach decomposes

the routing task into two steps. On the first step we divide the “garbage” class into the set of subclasses by one of the clustering algorithms and on the second step we define the call reason considering the “garbage” subclasses as separate classes. We apply genetic algorithms with the whole numbers alphabet, vector quantization network and hierarchical agglomerative clustering in order to divide “garbage” class into subclasses. The reason to perform such a clustering is due to simplify the detection of the class with non-uniform structure.

Our approach uses the concept of salient phrases: for each call reason (class) only 300 words with the highest term relevancies are chosen. It allows us to eliminate the need for the stop and ignore word filtering. The algorithms are implemented in C++.

As a baseline for results comparison we have tested some popular classifiers from RapidMiner, which we have applied to the whole database and the database with decomposition.

This paper is organized as follows: In Section 2, we describe the problem and how we perform the preprocessing. Section 3 describes in detail the way of the term relevance calculating and the possible rules of choosing the call class. In Section 4 we present the clustering algorithms which we apply to simplify the “garbage” class detection. Section 5 reports on the experimental results. Finally, we provide concluding remarks in Section 6.

Problem description and data preprocessing. The data for testing and evaluation consists of about 300.000 user utterances recorded from caller interactions with commercial automated agents. Utterances from this database are manually labeled by experts and divided into 20 classes (*_TE_NOMATCH*, *appointments*, *operator*, *bill*, *internet*, *phone* etc). Class *_TE_NOMATCH* includes utterances that cannot be put into another class or can be put into more than one class. The database is also unbalanced, some classes include much more utterances than others (the largest class *_TE_NOMATCH* includes 6790 utterances and the smallest one consists of only 48 utterances).

The initial database has been preprocessed to be a binary matrix with rows representing utterances and columns representing the words from the vocabulary. An element from this binary matrix, a_{ij} , equals to 1 if in utterance i the word j appears and equals to 0 if it does not appear.

Utterance duplicates were removed. The preprocessed database consisting of 24458 utterances was divided into train (22020 utterances, 90,032 %) and test set (2438 utterances, 9,968 %) such that the percentage of classes remained the same in both sets. The size of the dictionary of the whole database is 3464 words, 3294 words appear in training set, 1124 words appear in test set, 170 words which appear only in test set and do not appear in training set (unknown words), 33 utterances consisted of only

unknown words, and 160 utterances included at least one unknown word.

Term relevance estimation and decision rule. For each term we assign a real number term relevance that depends on the frequency in utterances. Term relevance is calculated using a modified formula of fuzzy rules relevance estimation for fuzzy classifier. Membership function has been replaced by word frequency in the current class. The details of the procedure are:

Let L be the number of classes; n_i is the number of utterances of the i th class; N_{ij} is the number of j th word occurrence in all utterances of the i th class; $T_{ji} = N_{ji}/n_i$ is the relative frequency of j th word occurrence in the i th class.

$R_j = \max_i T_{ji}$, $S_j = \arg(\max_i T_{ji})$ is the number of class which we assign to j th word;

The term relevance, C_j , is given by

$$C_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^L T_{ji}} \left(R_j - \frac{1}{L-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq S_j}}^L T_{ji} \right).$$

C_j is higher if the word occurs often in few classes than if it appears in many classes.

The learning phase consists of counting the C values for each term, it means that this algorithm uses the statistical information obtained from train set. We have tested several different decision rules defined in table 1.

The best obtained accuracies is achieved with the decision rule C , where the destination is chosen that has the highest sum of word relevancies from the current utterance. But we propose that only terms with highest value of RC (product of R and C) are contributed to the total sum. We have investigated the dependence of the new TRE approach on the frequent words number. The best accuracy rate was obtained with more than 300 frequent

words. By using only limited set of words we eliminated the need of stop and ignore words filtering. This also shows that the method works better if utterance includes terms with high C values. This approach requires informative well-defined classes and enough data for statistical model.

Table 1

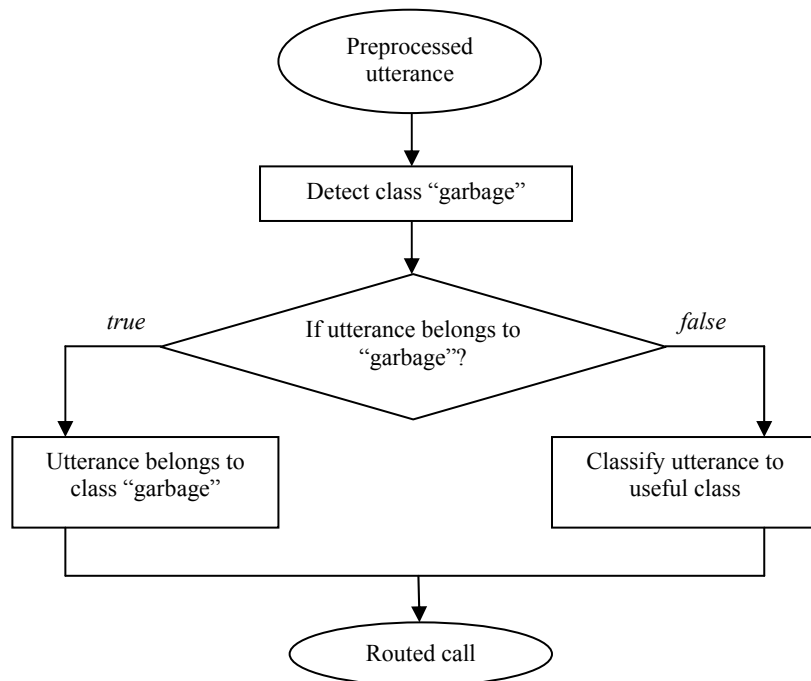
Decision Rules

	Decision rules	
RC	$A_i = \sum_{j:S_j=i} R_j C_j$	For each class i we calculate A_i Then we find the number of class which achieves maximum of A_i $winner = \arg(\max_i A_i)$
RC max	$A_i = \sum_{j:S_j=i} \max R_j C_j$	
C	$A_i = \sum_{j:S_j=i} C_j$	
C with limit	$A_i = \sum_{\substack{j:S_j=i \\ C_j > \text{const}}} C_j$	
R	$A_i = \sum_{j:S_j=i} R_j$	

Decomposition of classification problem. “Garbage” class (class TE_NOMATCH) contains 45 % words which do not appear in other classes and portion of “garbage” set is 27 % in the whole database. Furthermore, classification algorithms perform worse on it (it has the biggest classification error). Thus we split the classification task into two problems:

- Detect “garbage” class (class TE_NOMATCH);
- Classify the utterance to meaningful class.

The structure of whole process is given in figure.



Two-stage classification problem

In this case we use special classification method at the first stage. It can be standard classification method or our TRE-approach. For “garbage” class identification we need to unite all informative classes into one class and to teach classification methods for two-class problem definition. For the second stage we need to use only utterances of informative classes from learning sample for classification methods learning.

Clustering methods. After the analysis of the performances of standard classification algorithms on the given database, we can conclude that there exists one specific class (class `_TE_NOMATCH`) where all standard techniques perform worse. Due to the non-uniform structure of the “garbage” class it is difficult to detect the whole class by the proposed procedure. If we apply this procedure directly we achieve only 55 % of accuracy rate on the test data (61 % on the train data). We suggest to divide the “garbage” class into the set of subclasses using one of the clustering methods and then recount the values of C_j taking into account that there are 19 well defined classes and that the set of the “garbage” subclasses can be consider as separate classes.

In this paper the following clustering methods are used: a genetic algorithm with integers, vector quantization networks trained by a genetic algorithm, hierarchical agglomerative clustering with different metrics.

Genetic Algorithm. The train set accuracy is used as a fitness function. Each individual is the sequence of non-negative integer numbers (each number corresponds to the number of “garbage” subclass). The length of this sequence is the number of utterances from train set which belong to the “garbage” class. We apply this genetic algorithm to find directly the optimal clustering using differ-

ent numbers of clusters and we can conclude that with increasing the clusters number (in the “garbage” class) we get better classification accuracy on the whole database. We have used the following parameters of GA: population size = 50, number of generation = 50, weak mutation, tournament selection, uniform crossover, averaged by 50 runs. Applying this method we achieve about 7 % improvement of accuracy rate on train data and about 5 % on test data.

Vector Quantization Network. We have also implemented vector quantization network. For a given number of subclasses we search for the set of code vectors (the number of code vectors is equal to the number of subclasses). These code vectors are optimized using genetic algorithm where as a fitness function we use the classification quality on the train set. Each code vector corresponds to a certain “garbage” subclass. The object belongs to the sub-class if the distance between it and the corresponding code vector is smaller than the distances between the object and all other code vectors. Applying this algorithm to the given database we obtain results similar to the results of the genetic algorithm.

Hierarchical Agglomerative Clustering. In this work we consider hierarchical agglomerative binary clustering where we set each utterance to one subclass and then we consequently group classes into pairs until there is only one class containing all utterances or until we achieve a certain number of classes. The performance of hierarchical clustering algorithms depends on the metric (the way to calculate the distance between objects) and the criterion for clusters union. In this work we use Hamming metric and Ward criterion [11].

Table 2

Results of numerical experiments (classification accuracy for test sample)

Method	Learning and classification for all classes, %	Learning and classification only for informative classes, %	Learning for all classes, classification only for informative classes, %
1-NN	74,53	78,85	70,32
2-NN	68,87	75,04	60,26
3-NN	74,16	77,37	68,73
4-NN	72,60	76,75	66,23
5-NN	73,58	76,75	68,39
6-NN	73,05	77,37	67,99
7-NN	73,17	77,54	68,11
8-NN	73,26	77,49	67,99
9-NN	74,04	77,26	68,73
10-NN	73,95	77,43	68,85
15-NN	73,17	76,63	67,71
Bayes with Laplace correction	72,03	76,21	73,62
Bayes without Laplace correction	74,06	76,21	70,84
Bayes (Kernel)	72,03	77,77	73,62
Decision Stump	27,97	73,83	37,92
Rule Induction	40,48	76,21	18,76
Perceptron	21,74	73,83	32,45
Two-stage classification (TRE with clustering + TRE)	76,52	85,50	78,17
Two-stage classification (4-NN + TRE)	76,33	85,50	81,18
Two-stage classification (9-NN + TRE)	77,11	85,50	78,51

Experimental results. The approach described above has been applied on the preprocessed corpus which has been provided by Speech Cycle company.

We have tested standard classification algorithms (k-nearest neighbors algorithms (k-NN), Bayes classifiers, Decision Stump, Rule Induction, perceptron) and the proposed approach on the database with learning and classification for all classes, with learning and classification only for informative classes, and with learning for all classes and classification only for informative classes. We tested our TRE approach for two-stage classification problem definition. We use TRE approach with agglomerative hierarchical clustering (it is the best one) for “garbage” class, 4-NN, and 9-NN as classification methods for the first stage or the classification problem.

The results of numerical results you can see in table 2. In this table you can see that our new TRE-approach is the most effective for identification of informative classes. For “garbage” class identification it is better to use k-nearest neighbors algorithms.

Conclusions. This paper reported on call classification experiments on large corpora using a new term relevance estimation approach. We propose to split the classification task into two steps: 1) “garbage” class identification; 2) further classification into meaningful classes. The performance of the proposed algorithm is compared to several standard classification algorithms on the database without the “garbage” class and found to outperform them with the accuracy rate of 85,55 %. Combination of our approach with 9-NN algorithm for two-stage classification problem definition provides the accuracy rate of 77,11 % for test sample at whole.

We can conclude that our approach is appropriate and effective for call routing problem.

References

1. Chu-Carroll J. and Carpenter B. Vector-based natural language call routing, *Comput. Linguist.*, 1999, vol. 25, no. 3, p. 361–388.
2. Lee C.-H., Carpenter B., Chou W., Chu-Carroll J., Reichl W., Saad A., Zhou Q. On natural language call routing, *Speech Commun.*, Aug. 2000, vol. 31, no. 4, p. 309–320.
3. Gorin A. L., Riccardi G., and Wright J. H. How may I help you? *Speech Commun.*, 1997, vol. 23, p. 113–127.
4. Schapire R. E., Singer Y. BoosTexter: a boosting-based system for text categorization, *Mach. Learn.*, 2000, vol. 39, no. 2/3, p. 135–168.
5. Albalade A., Suendermann D., Pieraccini R., Minker W. 2009. *Mathematical Analysis of Evolution, Information, and Complexity*, Wiley, Hoboken, USA.
6. Albalade A., Suendermann D., Minker W. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 2011, 20(5).
7. Albalade A., Suchindranath A., Suendermann D., Minker W.. 2010. *Proc. of the Interspeech 2010, 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, Makuhari, Japan.
8. Albalade A., Rhinow S., Suendermann D. 2010. *Proc. of the ICAART 2010, 2nd International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Valencia, Spain.
9. Suendermann A., Liscombe J., Dayanidhi K., Pieraccini R. 2009. *Proc. of the SIGDIAL 2009*, London, UK.
10. Ishibuchi H., Nakashima T., Murata T. Performance evaluation of fuzzy classifier systems for multidimensional pattern classification problems, in *Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1999, vol. 29, p. 601–618.
11. Ward J. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, № 58, p. 236–244.

© Гасанова Т. О., Сергиенко Р. Б.,
Минкер В., Жуков Е. А., 2013

УДК 519.8

DISTRIBUTED SELF-CONFIGURING EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS DESIGN

D. I. Khritonenko, E. S. Semenkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: hdmityr.91@mail.ru, eugeneseamenkin@yandex.ru

In this paper we describe the method of automatic neural network design based on the modified evolutionary algorithms. The main features of the modification proposed are self-configuration and the usage of distributed computing. Implemented algorithms have been tested on the set of classification tasks. The comparison of the genetic algorithm and the genetic programming algorithm's efficiencies is presented.

Keywords: genetic algorithm, genetic programming, self-configuration, distributed computing, artificial neural network, classifiers, automated design.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д. И. Хритonenko, Е. С. Семенкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: hdmityr.91@mail.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

Описывается метод автоматического проектирования искусственных нейронных сетей на основе модифицированного эволюционного алгоритма. Главное свойство модификации заключается в самоконфигурировании алгоритма и распределенных вычислениях. Реализованные алгоритмы были протестированы на множестве задач классификации. Представлено сравнение эффективности генетического алгоритма и генетического программирования.

Ключевые слова: генетический алгоритм, генетическое программирование, самоконфигурирование, распределенные вычисления, искусственные нейронные сети, классификаторы, автоматизированное проектирование.

Self-configuring genetic algorithm. Genetic algorithm (GA) is an optimization method based on genetics and natural selection concepts [1; 2]. The use of GA in a problem solving is accompanied by the problem of relevant algorithm configuration selection.

In every task solving process there is certain optimal configuration (in terms of time consumption, number of calculations, number of fitness function calculation and etc.), which might be altered in process of algorithm functioning. Therefore, our task is to find such configuration to improve the program efficiency.

Flowchart of the self-configuring GA is presented in fig. 1. Presented scheme's difference from standart one [3] is self-configuration section. It allows perform an adjustment of a given configuration in the process of the algorithm execution.

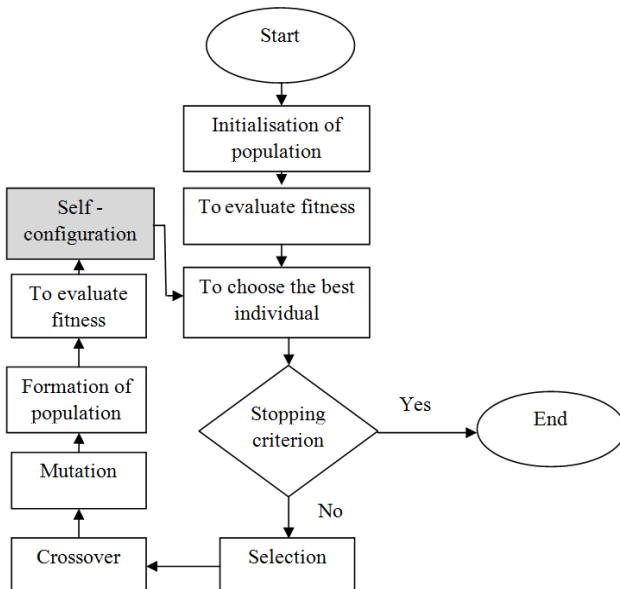


Fig. 1. Flowchart of self-configuring GA

Let us describe proposed adjustment approach. There are 3 groups of GA operators: selection, crossover, mutation. Each group represents a set of the following operators (table 1).

Table 1

Groups of the genetic operators

Selection	Crossover	Mutation
• Proportionate • Ranking • Tournament	• One-point • Two-point • Uniform	• Weak • Average • Strong

Operators shall compete for application in following algorithm iterations.

Let's call as progressive chromosome the chromosome which fitness value surpasses current population's average [4]. It's necessary to make following statement: the number of the progressive chromosome resulted by the use of selection operator is equal to the sum of progressive chromosome resulted from crossover and mutation processes. Probability of operator being chosen is calculated as in following formula:

$$P_i = \frac{q_i}{\sum_j q_j}, \quad (1)$$

where q_i is the number of progressive chromosomes, resulted from i -th operator. On the each algorithm iteration only one operator from each group is used. Therefore, it is crucial to accumulate certain number of iterations to enable further adjustment of operator selection probabilities.

Proposed approach allows adjusting several algorithms' parameters: type of selection/crossover/mutation. However, selection problem of the numerical parameters (such as tournament size) still exists.

Given algorithm has been realized in form of computer program and tested on optimization tasks. Main efficiency criteria of EA is reliability, as it evaluates solution finding probability of given task. The algorithm reliability is a percentage of successful runs when the problem solution is found with required precision.

Since GA is a stochastic algorithm, it's essential to evaluate efficiency by means of several runs. In our case, 100 unaltered program runs have been made for all algorithms. In figure 2, the reliability of conventional GAs with 90 different settings are compared with self-configuring GA on one test problem.

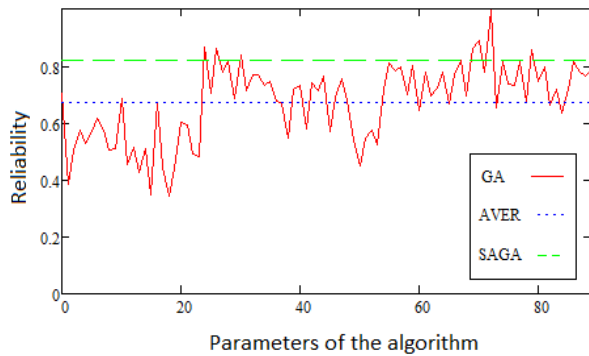


Fig. 2. GA reliability

The figure shows that the modification proposed (self-adjustment – SAGA) surpasses average GAs reliability value (AVER) and not much inferior to the reliability of GAs with the best parameters which resulted from the exhaustive search of settings.

Genetic algorithm in artificial neural network design.

In this paper the following encoding method of artificial neural network (ANN) design in GA is presented. Certain number of hidden layers and the maximal number of neurons are given. Number of neurons on each of the layers is encoded in chromosome and adjusted by the methods of GA. Moreover, in each neuron's chromosome specified number (type) of activation function is encoded. Resulting neural network is a perceptron with various activation functions.

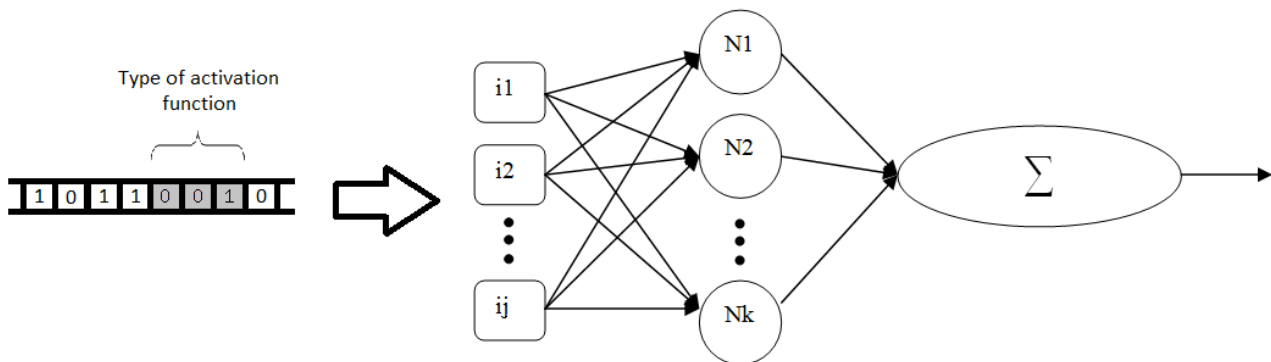


Fig. 3. An example of ANN

In this figure an example of simple ANN encoding by means of binary string is given. In this figure, N_k stands for k -th neuron (which is selected from the list of activation function) and i_j – j -th input data variable. Presented algorithm has been realized in the form program system (ANN_GA). Its effectiveness and comparison with existing algorithms is presented below. Learning procedure is based on the algorithm presented above.

Self-configuring genetic programming algorithm.

Generally, functioning of genetic programming algorithm (GPA) is close to the one of genetic algorithm [5]. The most striking difference is in the encoding procedure. Whilst in GA individual is presented as a binary string of a pre-determined length, GPA uses trees.

The proposed above configuration selection schema has been applied to GPA. Moreover, a modification of the uniform crossover operator [6] is presented in the algorithm. When specified node transportation probability is given only one offspring is created, node sub-trees with different number of arcs compete for usage in crossover. Any another aspect of this algorithm is executed as specified in [7]. An example of this crossover is represented in the figure below.

Presented approach enables to control the trees' complexity. Designed self-configuring GA has been used for the purposes of adjustment of trees' parameters.

Realized as a program system, algorithm has been tested on classification tasks [8]. Australian credit is a task of suspicious bank transactions discovery. This task has 14 variables and 2 classes. German credit is a task of trustworthiness evaluation. This task has 24 variables and

2 classes. Efficiency comparison between proposed algorithm and existing algorithms are shown in the following spreadsheet [9] (table 2).

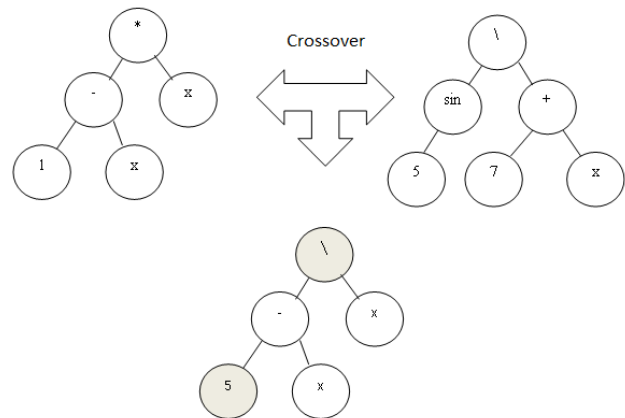


Fig. 4. An example of uniform crossover

Algorithm efficiency criteria:

$$I = 1 - \frac{ERROR}{n}. \quad (2)$$

In this formula ERROR is the number of incorrectly classified objects, n is an overall amount of sample. In tab. 2 average values of 50 runs are given. Sample has been separated into 2 groups (test and training samples). Test sample ratio is 20:80. As represented in previous spreadsheet, proposed self-configuring GPA has shown

moderate results. So, developed self-configuring algorithm in classification tasks has shown results comparable to existing analogues.

Genetic programming algorithm for artificial neural network design. For the purposes of the automated neural network design it's necessary to choose the tree neural network encoding method. Binary trees shall encode neural network. In this algorithm the terminal set embraces all input data variable and neurons with different types of activation function. Functional set shall contain following operators:

“+” – operator which allows to form a layer which includes several neurons;

“>” – operator that indicates that “left” sub-tree output data serves as an input data for the “right” sub-tree;

“<” – vice versa.

Illustration of encoding methods is shown below:

In this figure an example of simple ANN encoding by means of tree is given. In this figure, N1 stands for 1-

st type neuron (which is selected from the list of activation functions) and i_j – j -th input data variable.

Presented algorithm has been implemented in the form of program system (ANN_GP). It's effectiveness and comparison with existing algorithms is presented below. As stated before, GP designed ANN structure learning procedure is based on GA.

Presented algorithms have been tested on classification tasks [8] in conditions specified above. Efficiency criteria are calculated as in the formula (2).

Algorithms have proved high efficiency in solving classification tasks. Worth noting that, ANN_GA and ANN_GP have shown equal efficiency in Wilcoxon signed-rank test. For such purposes 5 series of tests by 10 runs have been conducted. However, GA computing time has been 3 times longer by average. It can be explained by GA encoding multi-layer perceptron with many connections between neurons. Network training in such case is very consuming in terms of resources.

Table 2

The test results

Algorithm name	Australian credit	German Credit	Algorithm name	Australian credit	German credit
SCGP	0,9022	0,7950	Boosting	0,7600	0,7000
MGP	0,8985	0,7875	Bagging	0,8470	0,6840
2SGP	0,9027	0,8015	RSM	0,8520	0,6770
GP	0,8889	0,7834	CCEL	0,8660	0,7460
Fuzzy classifier	0,8910	0,7940	CART	0,8744	0,7565
C4.5	0,8986	0,7773	MLP	0,8986	0,7618
LR	0,8696	0,7837	GP	0,8874	0,7697
k-NN	0,7150	0,7151			

Table 3

The test results

Algorithm name	Australian Credit	German credit	Algorithm name	Australian credit	German credit
SCGP	0,9022	0,7950	Boosting	0,7600	0,7000
MGP	0,8985	0,7875	Bagging	0,8470	0,6840
2SGP	0,9027	0,8015	RSM	0,8520	0,6770
GP	0,8889	0,7834	CCEL	0,8660	0,7460
Fuzzy classifier	0,8910	0,7940	CART	0,8744	0,7565
C4.5	0,8986	0,7773	MLP	0,8986	0,7618
LR	0,8696	0,7837	ANN_GA	0,8994	0,7589
k-NN	0,7150	0,7151	ANN_GP	0,9001	0,7596

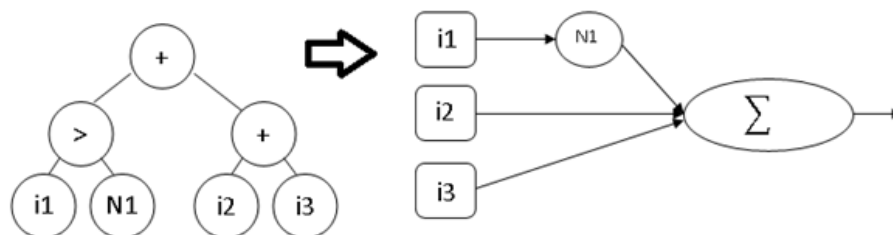


Fig. 5. Neural network encoding example

Distributed computing. EA realization by means of distributed computing application is suggested. It means that all node calculations shall be executed by logic cores of computing systems, while algorithm itself shall not be altered. The main idea is that each one of the threads processes certain groups of individuals.

Worth noting that EA are stochastic. Distribute computing shortens the time-consumption without affecting any other criteria. Such effect has been achieved by means of master-thread usage, which was responsible for random number generator. Wilcoxon signed-rank test as well proves that reliability has not been affected.

Test has been conducted on a PC with following specifications:

- Operating System: Microsoft Windows 7;
- CPU: AMD FX8320 (@3.5GHz);
- RAM: 16GB.

Following graph shows dependency of the time-consumption from a number of logic cores used.

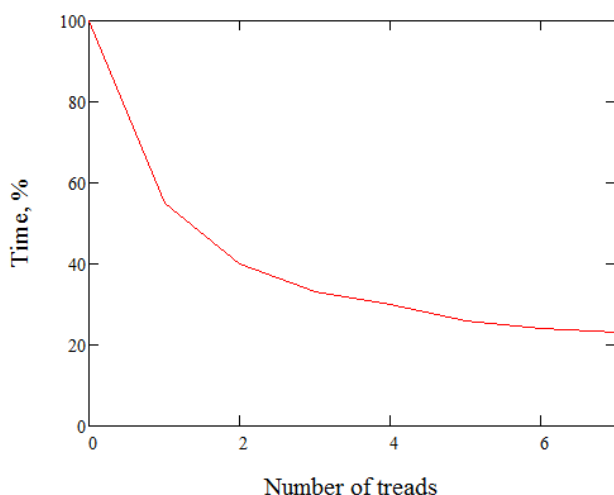


Fig. 6. The test results

Conclusions. Following algorithms have been developed and implemented: distributed self-configuring GA and GPA. Algorithms have been tested on a series of tasks and proved their effectiveness. Additionally, on ba-

sis of these algorithms the new artificial neural network design systems have been developed and tested on classification tasks.

Self-configuration enables to solve one of the actual tasks – genetic operator selection in EA. Distributed computing shortens the time-consumption without affecting efficiency. It might be useful in the case that involves great amount of time being spent on calculation. Judging from presented approaches comparison one should conclude that GPA is preferable in cases of artificial neural network design.

References

1. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
2. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. MIT Press. Cambridge, VA, 1992.
3. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems: translation from polish. I. D. Rudinsky. Moscow, Hotline. Telecom, 2006, 383 p.
4. Myasnikov A. S. Insular genetic algorithm with genetic operators probabilities dynamic choice. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/136503.html>.
5. Koza J. Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Nature Selection, 1992.
6. Semenko E., Semenkina M. Self-Configuring Genetic Programming Algorithm with Modified Uniform Crossover. In: Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, 2012.
7. Poli R., Langdon W. B. On the Ability to Search the Space of Programs of Standard, One-Point and Uniform Crossover in Genetic Programming. Technical Report CSRP-98-7. The University of Birmingham (UK), 1998, 21 p.
8. Machine Learning Repository UCI. Available at: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>.

© Христоненко Д. И., Семенкин Е. С., 2013

УДК 519.6

SELF-CONFIGURING GENETIC PROGRAMMING ALGORITHM FOR MEDICAL DIAGNOSTIC PROBLEMS

E. A. Popov, M. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: epopov@bmail.ru, semenkina88@mail.ru

Genetic programming algorithm for neural network automatic design is suggested. Ensemble member competence estimations based procedure of decision making with intelligent information technologies is proposed. Effectiveness of the approach is proved on the benchmark and real-world medical diagnostic problems.

Keywords: intelligent information technologies, genetic programming algorithm, ensemble based decision making.

САМОКОНФИГУРИРУЕМЫЙ АЛГОРИТМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Е. А. Попов, М. Е. Семенкина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: epopov@bmail.ru, semenkina88@mail.ru

Рассматривается алгоритм генетического программирования для автоматизированного проектирования нейронных сетей. Предлагается алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования ансамблей интеллектуальных информационных технологий. Эффективность подхода проверена на тестовых и прикладных задачах медицинской диагностики.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные технологии, алгоритм генетического программирования, коллективное принятие решений.

Recently, the importance of information support of various medical technologies is steadily increasing. The psychological aspect of the information technology application for medical purposes has a great importance in association with the doctor work peculiarities. In this case reasons for the decision are very important, especially if it is offered by computer [1].

Although genetic programming (GP) [2] have been successfully used in solving many real world problems, the performance of this technique essentially depends on the selection of its settings and tuning parameters. The process of settings determination and parameters tuning is known to be a time-consuming and complicated task. That forces the end user to worry about the decision-making quality. This research devoted to “self-adapted” GP is based on a range of ideas aimed at reducing the human expert role in algorithm designing. This should increase the validity of the decision-making process.

The rest of the paper is organized in following way. Section 1 describes the proposed method for GP self-configuring as well as testing results over the benchmark symbolic regression problems. Neural networks design with GP is described in Section 2, in Section 3 the ensemble design method is described, Section 4 contains the performance comparison of suggested algorithms and alternative approaches on three real world medical diagnostic problem. In Conclusion we discuss obtained results and directions of the future research.

Self-configuring genetic programming algorithm. It is necessary to find solution for the main problem of evolutionary algorithms before suggesting for end users to apply genetic programming algorithm for automated design of tools for solving classification problems. Choosing the right GP setting for each problem is a difficult task even for experts in the field of evolutionary computation, so we need to find a way to avoid it.

In our algorithm [3] operators’ probabilistic rates dynamic adaptation on the level of population with centralized control techniques was applied (see Fig.1). Instead of the real parameters adjusting, setting variants were used, namely types of selection (fitness proportional, rank-based, and tournament-based with three tournament sizes), crossover (one-point, two-point, as well as equiprobable, fitness

proportional, rank-based, and tournament-based uniform crossovers [3]), population control and level of mutation (medium, low, high for two mutation types). Each of these has its own initial probability distribution (fig. 2) which are changed as algorithm executes (fig. 3).

The uniform crossover operator in evolutionary algorithms is known as one of the most effective crossover operators. For this reason, uniform crossover operator for GP was modified in [3] with a purpose of improving its performance. Modification gives the possibility to fulfill uniform crossover also in case when nodes have different arity because all functions’ arguments compete with each other. E. g., if one tree is “EXP – X” ($\exp(x)$) and other one is “+ – Y – Z” ($y+z$) and the off-spring inherits the node “+” then resulting subtree can be one of “ $y+z$ ”, “ $x+z$ ” or “ $y+x$ ”. If the off-spring inherits the node “EXP” then resulting subtrees can be “ $\exp(x)$ ”, “ $\exp(y)$ ”, “ $\exp(z)$ ”. This modification brings more flexibility to the crossover process and adds the potential for a change in the algorithms behavior.

Selective pressure during the recombination process was introduced making the probability of a parental gene being passed to the off-spring depended on parent fitness values. The off-spring can inherit every of its nodes from one of parents not only equiprobably but also with different probabilities determined by parent fitness values in one of the ways like the usual selection operators. Fitness proportional, rank-based and tournament-based uniform crossover operators were added to the conventional operator that can be called now the equiprobable uniform crossover.

As a commonly accepted benchmark for GP algorithms is still an “open issue” [4], the symbolic regression problem with 17 test functions borrowed from [5] were used in [3] for testing the modified genetic programming algorithm with new uniform crossover operators (MGP).

Results of self-configuring GP (SelfCGP) performance evaluation over 17 test problems and the performance comparison with conventional GP are presented in Table 1 below ([3]). Experiments settings are 100 individuals, 300 generations and 100 algorithm runs for each test function. The variance is given over 17 test functions. The reliability is the portion of the runs for a given algorithm that gives satisfactorily precise solution (MSE is less than 0.01). Statistical significance was estimated with ANOVA.

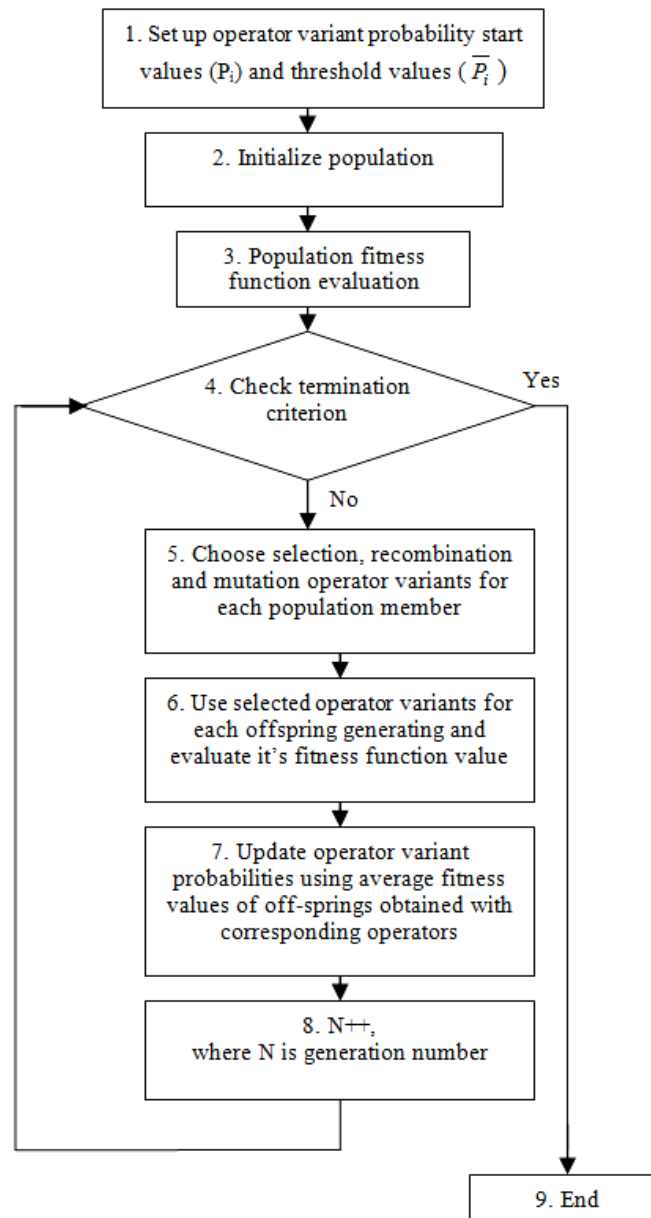


Fig. 1. Main part of SelfCGP block diagram

From table 1 we can see that GP with modified uniform crossover operators (MGP) performs better than conventional GP. This demonstrates that proposed operators may be useful.

SelfCGP reliability averaged over 17 test function is better than averaged best reliability of conventional GP and slightly less than best reliability of modified GP. The worse reliability (for the most hard problem) averaged over 100 runs is equal to 0.42. The best reliability is equal to 1.00. Computational efforts are less than alternative algorithms have. It gives us a possibility to recommend SelfCGP for solving symbolic regression problems as the better alternative to the conventional GP. Main advantage of SelfCGP is no need of algorithmic details adjustment without any losses in the performance that makes this algorithm useful for many applications where end users being no experts in evolutionary modeling nevertheless intend to apply GP for solving these problems.

Solving symbolic regression problems, it is interesting to have not only the precise enough computational procedure but also a symbolically correct answer, i. e. exactly the same analytical expression that was used to generate data base. The last three columns in table 1 contain information on the quality of the obtained approximations. The first column shows the percentage of precise solutions symbolically identical to the test function. The second one shows the percentage of conditionally precise solutions that needed some elementary transformations and numbers rounding to be symbolically identical to the test function. The third column shows the percentage of the obtained solutions which cannot be transformed into a symbolically identical form (but give enough good approximation).

We can add that the self-configuration itself (without new uniform crossover operators use) does not improve this ability of the conventional GP. Such a role of uniform

crossover operators in GP can be explained through the observation that these operators prevent GP tree's blow up which usually complicates the symbolic expression and gives no possibility to find precise solution.

ANN design with GP. We have to describe our way to model and optimize an ANN structure with GP before an employment of our SelfCGP algorithm.

Usually, GP algorithm works with tree representation, defined by functional and terminal sets, and exploits of the specific solution transformation operators (selection, crossover, mutation, etc.) until termination condition will be met [6].

The terminal set of our GP includes input neurons and 15 activation functions such as bipolar sigmoid, unipolar sigmoid, Gaussian, threshold function, linear function, etc. The functional set includes specific operations for neuron placement and connections. The first operation is the plac-

ing a neuron or a group of neurons in one layer. There will be no additional connections appeared in this case. The second operation is the placing a neuron or a group of neurons in sequential layers in such a way that the neuron (group of neurons) from the left branch of tree preceded by the neuron (group of neurons) from the right branch of tree. In this case, new connections will be added that connect the neurons from the left trees branch with the neurons from the right trees branch. Input neurons cannot receive any signal but have to send a signal to at least one hidden neuron. It might be so that our GP algorithm does not include some input neurons in resulting tree, i. e., high performance ANN structure that uses not all problem inputs can be found. This feature of our approach admits using our GP for the selection of the most informative problem inputs combination. Tree and corresponding neural network example are presented on the figure 4.

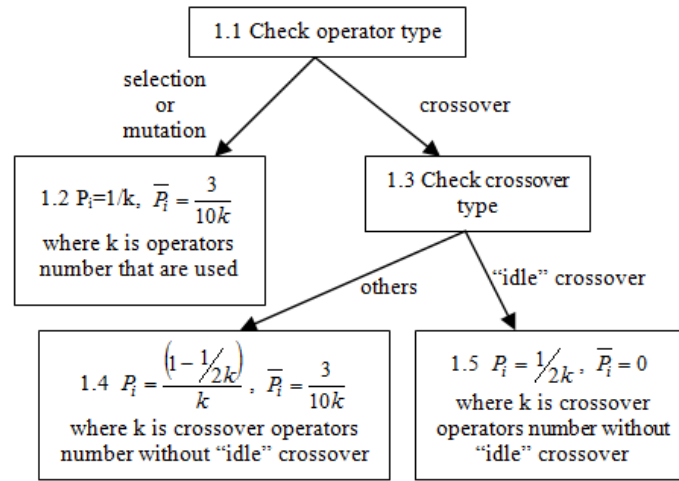


Fig. 2. Flowchart illustrating step 1 in SelfCGP block diagram

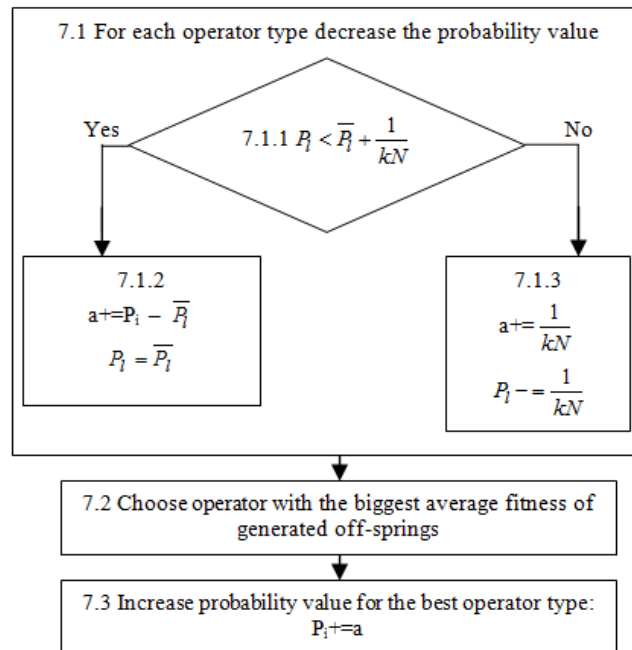


Fig. 3. Flowchart illustrating step 7 in SelfCGP block diagram

Table 1

Self-configuring GP performance over test symbolic regression problems

Algorithms	Reliability			Average generations variance	Precise solutions, %	Cond. precise solutions, %	Approx. Solutions, %
	On the most simple task	On the most difficult task	In general				
GP	0,77 [0,41; 0,91]	0,13 [0; 0,27]	0,43 [0,00; 0,91]	[33; 289]	50	16	34
MGP	0,79 [0,39; 1]	0,34 [0,15; 0,43]	0,53 [0,11; 1,00]	[27; 243]	58	20	22
SelfCGP without MGP	0,83	0,19	0,46 [0,19; 0,83]	[35; 254]	50	17	33
SelfCGP	1	0,48	0,69 [0,42; 1,00]	[49; 201]	58	16	26

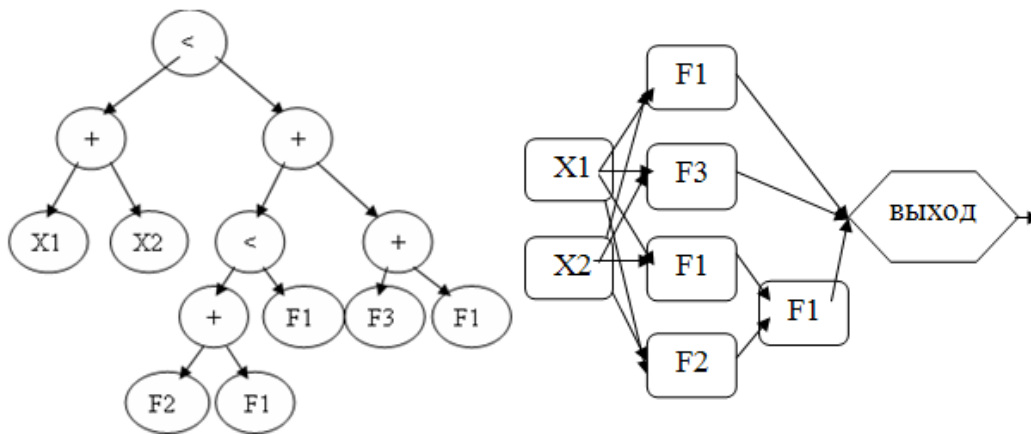


Fig. 4. Tree and corresponding neural network example

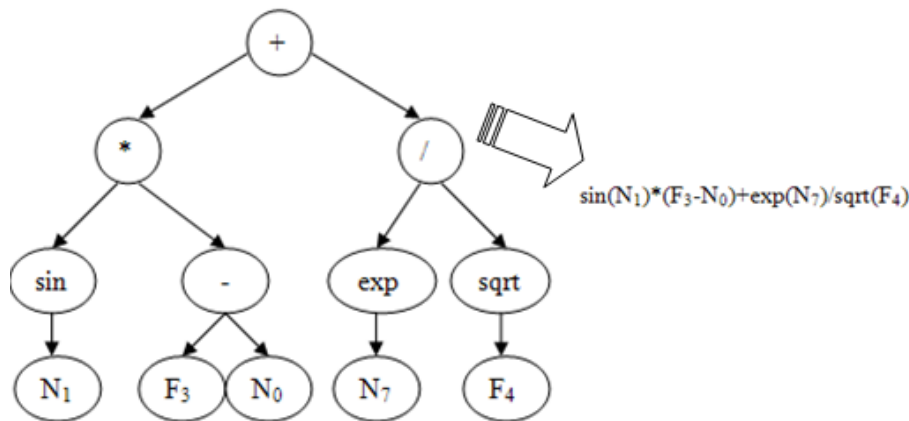


Fig. 5. Tree and corresponding decision making ensemble formula example

The GP algorithm forms the tree from which the ANN structure is derived. The ANN training is executed to evaluate its fitness that depends on its performance in solving problem in hand, e.g., approximation precision or number of misclassified instances. For training this ANN, connection weights are optimized with special self-configuring genetic algorithm (SelfCGA) that does not need any end user efforts to be the problem adjusted doing it automatically. We have no place here to go into the details of SelfCGA, referring to our other paper [7] but have to say that it is based on the same ideas as the self-configuring genetic programming algorithm described in

the previous section. When GP finishes giving the best found ANN structure as the result, this ANN is additionally trained with again SelfCGA hybridized with local search.

The efficiency of the proposed approach was tested on a representative set of test problems (approximation, time series prediction). Averaging of the mean square error was carried out by 20 runs. The test results showed that the neural networks created by genetic programming algorithm have a small number of neurons in comparison with neural networks obtained by means of neuro-simulator and are not fully connected (few connections

between neurons). These neural networks have enough small mean square error.

Integration of IIT ensembles with self-configuring genetic programming algorithm. Usual practice of data analysis problems solving lies in the fact that the structure choice and parameters setting of a separate intelligent information technology (IIT) are performed and then the best found IIT solves the problem. However, the solutions quality improvement is particularly important for solving problems of medical diagnosis and it is desirable to have a set of IIT and to use all of them at the same time according to the chosen ensemble technology.

In this paper we apply self-configuring genetic programming algorithm to build a common method of decision making by IIT ensemble through the creation of symbolic regression formulas with various IIT as elements of the terminal set.

Having the developed appropriate tool for IIT automated design that does not require the effort for its adjustment, we applied our self-configuring genetic programming technique to construct the formula that shows how to compute an ensemble decision using the component IIT decisions. The algorithm involves different operations and math functions and uses the models of different kinds providing the diversity among the ensemble members. In our numerical experiments, we use symbolic expressions and neural networks, automatically designed with our SelfCGP algorithm, as the ensemble members. The algorithm automatically chooses the component IIT which are important for obtaining an efficient solution and doesn't use the others. The ensemble component IIT are taken from the preliminary IIT pool that includes 20 ANNs and 20 symbolic regression formulas (SRFs) generated in advance with SelfCGP.

Ensemble decision making method example is presented on the Fig. 5, where $N_0, N_1, N_2, \dots, N_{10}$ are ANNs from preliminary pool, $F_0, F_1, F_2, \dots, F_{10}$ are symbolic regression formulas from preliminary pool, at the same time better IIT has smaller number, i.e. N_0 is the best ANN in preliminary pool.

The proposed procedure has been implemented as a software system and tested on a test problems representative set.

Approbation on applied problems of medical diagnostics. To test the proposed approach, we used three practical problems of medical diagnosis: breast cancer diagnosis (11 attributes, 2 classes, 458 patients records with benign cancer and 241 records with malignant tumors), diabetes diagnosis (9 inputs, 2 classes, 500 patients with a negative result and 268 patients positive for diabetes) and Heart Disease diagnosis (14 inputs, 2 classes, 303 instances). Input data were taken from [8]. In the problem of cancer diagnostic we need to determine the type of tumor (benign or malignant) throw the existing test result (tumor cell characteristics (shape, thickness, uniformity, etc.)). In the diabetes diagnostics problem we need to determine whether a patient is sick with diabetes (all patients are women older than 21 years) according to available data (on age, ancestry, pregnancies number, body mass index, skinfold size, the glucose amount in the plasma, the insulin amount in the blood serum, blood pressure, etc.). For these two problems evaluations were fulfilled in the same manner as in [9], i. e. indicator is equal to weighted sum of mean squared error and quality of classification. Results for comparison for the last problem were taken from [10; 11]. For this problem the indicator is the error of classification.

Table 2

Ensembling methods comparison

Classifier	Cancer	Diabetes	Heart
SelfCGP+ANNE	0	17,18	0,156
SelfCGP+ANN+SRF+Ens.	0,06	17,43	0,161
SelfCGP+SRFE	0,34	18,21	0,168
Bagging (SelfCGP+ANN)	0,67	18,22	0,171
Bagging (SelfCGP+SRF)	0,95	19,34	0,176
ANN w. a.	1,03	19,03	0,179
ANN s. a.	1,09	19,75	0,183
SRF w. a.	1,22	19,86	0,186
SRF s. a.	1,27	20,23	0,193
ANN+SRF w. a.	1,09	19,34	0,178
ANN+SRF s. a.	1,18	19,79	0,181
SelfCGP+ANN	1,05	19,69	0,185
SelfCGP+SRF	1,23	20,01	0,188
CROANN	1,06	19,67	—
GANet-best	1,06	24,70	—
COOP	1,23	19,69	—
CNNE	1,20	19,60	—
ESANN	0,95	20,93	—
GSOANN	0,65	19,79	—
NLCS (neural-based learning classifier systems)	—	—	0,16
Neural Ensemble	—	—	0,181
NeC4.5	—	—	0,194

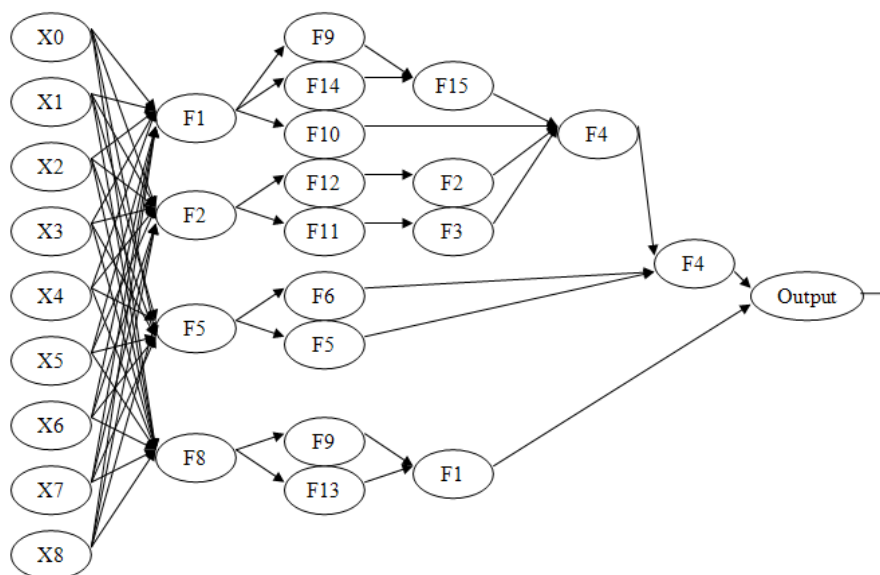


Fig. 6. Example of ANN for Diabetes diagnostic problem

For the designing every IIT, corresponding data set is randomly divided into three parts, i. e., training sample (60 %), validation sample (20 %) and test sample (20 %).

The first three lines contain results of the ensembling method suggested in this paper for three kinds of ensemble members – ANNs (ANNE), symbolic regression formulations (SRFE) and both (ANN+SRF+Ens.). Next eight lines contain results for conventional methods of ensemble forming – bagging, simple (s. a.) and weighted averaging (w. a.). Next two lines show results of single best technologies (ANN and SRF) automatically generated with SelfCGP. Results of these thirteen lines are averaged over 20 independent runs. The statistical robustness of the results obtained was confirmed by ANOVA tests which were used for processing received evaluations of our algorithms performance.

Results in table 2 demonstrate that the SelfCGP based ensembling method used the ANNs or ANNs and SRFs integration outperforms conventional ensembling methods, the single best ANN and SRF designed with SelfCGP as well as other given classification methods.

Example of ANN for Diabetes diagnostic problem is presented on the fig. 6. Ensembles obtained by solving the diabetes diagnostic problem have the form

$$\frac{F_2}{2.11} \sqrt{e^{F_8 F_7 F_4}} \quad (\text{for symbolic regression formulations})$$

$$\text{and } \sin\left(\frac{N_2 + N_8 + N_9}{1.998}\right) + 0.02 \quad (\text{for ANN}).$$

Conclusions. Thus developed software system for intelligent information technology ensembles automated design allows solving complex problems of medical diagnostics. IIT ensemble design increases the efficiency and reliability of IIT application. The efficiency of this approach has been verified not only on the test but also on the real practical problems that allows us to recommend it for end users as a convenient and effective tool for data mining.

The further development of the system is aimed to the expansion of its functionality by including the other types of IITs (fuzzy logic systems, decision trees, neuro-fuzzy systems, other kinds of ANNs, multiobjective selection, etc.).

References

1. Jarikov O. G., Litvinin A. A., Kovalev V. A. Expert systems in medicine. *Medezinskie novosti*. 2008, № 10, p. 15–18 (in Russian).
2. Koza J. R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, MA, Cambridge (1992).
3. Semenkin E., Semenkina M. Self-Configuring Genetic Programming Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE CEC), p. 1918–1923. Brisbane, Australia (2012).
4. O'Neill M., Vanneschi L., Gustafson S., Banzhaf W. Open issues in genetic programming. In: Genetic Programming and Evolvable Machines 11, p. 339–363 (2010).
5. Finck S. et al. Real-parameter black-box optimization benchmarking 2009. In: Presentation of the noiseless functions. Technical Report Research Center PPE (2009).
6. Poli R., Langdon W. B., McPhee N. F. A Field Guide to Genetic Programming. Published via <http://lulu.com> and freely available at <http://www.gp-field-guide.org.uk>, 2008 (With contributions by J. R. Koza).
7. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. Y. Tan, Y. Shi, and Z. Ji (Eds.): Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science 7331. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, p. 414–421.
8. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA:

University of California, School of Information and Computer Science. 2010.

9. Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K. Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization. In 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2011), New Orleans, LA, 2011.

10. Dam H. H., Abbass H. A., Lokan C., Yao X. Neural-Based Learning Classifier Systems. IEEE Transactions

on Knowledge and Data Engineering. 2008, vol. 20, № 1, p. 1–14.

11. Zhi-Hua Zhou and Yuan Jiang. NeC4.5: Neural Ensemble Based C4.5. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 2004, № 16.

© Попов Е. А., Семенкина М. Е., 2013

УДК 005; 519.7; 303.732

ABOUT PERFORMANCE IMPROVEMENT OF EVOLUTIONARY STRATEGIES TECHNIQUE APPLIED TO OPTIMAL CONTROL PROBLEM INDIRECT METHOD

I. S. Ryzhikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation.
E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru

The optimal control problem for nonlinear dynamic systems is considered. The proposed approach is based on both partially analytical and partially numerical techniques of the optimal control problem solving. Optimal control problem is reduced to unconstrained extremum problem, which is related to seeking for the initial point of the co-state variables that would satisfy the boundaries. To solve the optimization problem, well-known global optimization techniques are suggested and compared. The performance of the evolutionary strategies algorithm was increased by implementing the special restarting condition in the scheme.

Keywords: stochastic optimization, optimal control, indirect method, variation problem, dynamic system.

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ЭВОЛЮЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЯМЫМ МЕТОДОМ

И. С. Рыжиков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru

Рассматривается задача нахождения оптимального управления для нелинейных динамических систем. Предложенный подход основан на частично аналитическом и частично численном решении задачи оптимального управления. Исходная задача сводится к задаче поиска экстремума функций без ограничений, решением которой являются начальные координаты для сопряженных переменных, при которых удовлетворяются граничные условия. Для решения приведенной задачи сравнивались различные широко известные методы глобальной оптимизации. Эффективность метода эволюционных стратегий была повышена через введение специального условия на перезапуск алгоритма.

Ключевые слова: стохастическая оптимизация, оптимальное управление, косвенный метод, вариационная задача, динамическая система.

In this paper the idea of modified evolutionary strategies algorithm performance improvement is investigated. Some hypotheses about the ways to increase the efficiency were put forward. In previous work the different evolutionary and nature-based algorithm were examined and it was shown that these techniques are not reliable, so there is a need in special operands to be implemented. Current work consists of problem definition, previous results and suggested improvements.

The optimal control problem for dynamic systems

with one control input and integral functional is considered. Since the problem is old and it originates from the practical needs, there exist many techniques to solve the optimal control problem in different problem definitions and for different systems. But the developing of the modern technologies creates new optimal control problems that cannot be solved via well-known and classical approaches. The main problem is nonlinearity of the system model or the criterion. In general case, there is no universal analytical technique that guarantees the solution of

nonlinear differential equation to be found. But using the maximum principle, we can always determine the characteristics of the function that is suspected to be the solution of the optimal control problem.

On the other hand, the numerical approaches are useful and efficient but only for some problems that they were designed for. Any control function approximation technique that is being used to determine the solution for the initial optimal control problem is related with reduction of the problem to extremum seeking on the real vector field. And the problem reduction uses a convolution of different objective functions and penalty functions for all the constraints, and it requires more computational resources and more efficient optimization algorithms. There is no doubt that the direct method based techniques are efficient, but increasing of accuracy of the function approximation leads to increasing of extremum problem dimension.

The indirect method of solving the optimal control problem is related with solving the extremely difficult boundary-value problem, but the found solution gives us the proper control function with the known structure. In the given study the shooting method is based on the modified evolutionary optimization algorithm.

It is important to highlight that there is a sufficient benefit of using the information science techniques of solving the complex optimization problems. The modern methods and algorithms from the fields of informatics, bioinformatics and cybernetics are reliable, flexible and highly efficient techniques. And it is possible to improve them for every distinct optimization problem with unique characteristics via modifying the schemes, operators or hybridizing the algorithms.

Many works on optimal control problem solving for nonlinear dynamic systems are about some specific tasks. Many works are about the approaches to solve optimal control problems for affine nonlinear systems, like the work mentioned before, for example, [1] and [2]. In the last article the studied problem is related to optimal control of nonlinear systems via usage of the Lyapunov functions, but only one boundary in problem definition is considered. Also, in article [3] the approach of predictive optimal control for nonlinear systems is considered. There are plenty of numerical techniques application examples, [4]. Actually, since the problem is complex and there are many problems with unique features, and there are many different problem definitions for optimal control.

These techniques also require an analytical form of the system state and fit only the considered structures. And in our study, the proposed approach with implementation of some efficient global optimization technique is suggested to be applicable and reliable for solving many optimal control problems, as an effective analogue to shooting-based techniques.

In the study [5] symbolic-numeric indirect approach is considered, which is based on Newton Affine Invariant scheme for solving boundary value problem, which fits the considered systems and is being different technique of solution seeking. Following scheme can find also a local optimum.

The evolutionary strategies algorithm was used to solve the optimal control problem, but as a direct method. In the paper [6] the control function was discretized and every part of it was optimized via evolutionary strategies algorithm. That means, that there are as many optimization variables, as many discrete points are approximating the control.

The method of semi-analytical and semi-numerical optimal control problem solving is considered. The first part of the method is based on the Pontryagin's maximum principle [7], after determination of the Hamiltonian, the system with co-state variables can be used. For the new system that is a transformation of the initial problem it becomes possible to reduce the optimal control problem to extremum seeking on a real vectors' field.

Let the system be described with nonlinear differential equation

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t), \quad (1)$$

where $f(\cdot) : R^n \times R \times R^+ \rightarrow R^n$ is a vector function of its arguments; $x \in R^n$ is a vector of system state; $u \in R$ is a continuous control function; n is the system dimension.

We need to find a control function $u(t)$ that would bring the system from the initial point $x(0) = x^0$ to the end point $x(T) = x^*$ within a finite time T . Also, the control function and the system state are the functions that deliver the extremum to the given functional

$$I(x, u) = \int_0^T F(x, u) dt \rightarrow \text{extr}. \quad (2)$$

To find the solution for the variational problem with constraints one can use a common technique. First of all, one should find the Hamiltonian [7], that is defined by the following equation:

$$H(x, u, t) = -F(x, u) + p \cdot f(x, u, t), \quad (3)$$

therefore the system with co-state variables p can be determined with equations

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t), \quad \frac{dp}{dt} = \frac{-dH}{dx}. \quad (4)$$

The given system (4) is completed with system state and co-state variables' starting points $x(0) = x^0$ and $p(0) = p^0$, respectively. It actually means, that the control function $u(t)$ can be determined by choosing different values for starting point for the co-state variables, p^0 . To close up the system and to determine the control function as the function of state or co-state variables, the condition of Hamilton stationary is used,

$$\frac{dH}{du} = 0. \quad (5)$$

Since the differentiation of the symbolic expression is not a common problem, the forming of the system in the current study was not made automatically. Anyway, some mathematical softwares are able to operate with analytical problems, simplify expressions and differentiate them.

That is why it seems promising that the general method can be realized in one program in the future.

The structure of the control function is determined by equation (5). After using of the transversability conditions, by changing the starting point of the co-state variables, we change the control function and the solution of the optimal control problem.

Normally, it means that the proper vector of the co-state variables initial point, which provides the condition $x(T) = x^*$ would give us the solution for the whole problem, since the functional (2) and the differential equation (1) are forming the system (4). Initial point is the real vector and it could be searched with some optimization technique.

Since the main problem is reduced to optimization problem on the field R^n , let the $x(t), p(t)|_{p(0)=p^0}$ be the solution for the system (4) in case of $p(0) = p^0$ is being the starting point for the co-state variables. Now it is possible to define a criterion,

$$K(p^0) = \|x^* - \tilde{x}(T)|_{\tilde{p}(0)=p^0}\| \rightarrow \min_{p^0}. \quad (6)$$

The proposed criterion generally is multimodal, complex function of its arguments. It is not known, of course, where any extremum is located. Moreover, if the initial system (1) or functional (2) that forms the Hamiltonian (3) is nonlinear, so there is no analytical solution for the given criterion (6) and it can be evaluated only numerically.

The given criterion (6) is being transformed into fitness function for the evolutionary algorithms

$$fitness(p^0) = \frac{1}{1 + K(p^0)},$$

so the fitness function is a mapping: $R^n \rightarrow [0, 1]$. The greater fitness is, the better current solution is.

To prove the high complexity of the optimization problem let the system be defined by equation

$$f(x, t, u) = \begin{pmatrix} \ln(x_1) + \cos(x_0) \\ t \cdot \sin(x_1) + u(t) \end{pmatrix}, \quad T = 1, \quad (7)$$

$$x^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad x(T) = \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

and the integrand function for the functional of the optimal control problem

$$F(x, u) = u^2 \rightarrow \min_u. \quad (8)$$

is considered. Then, it is necessary to define the extended system (4),

$$F_p(x, p, t) = \begin{pmatrix} \ln(x_1) + \cos(x_0) \\ t \cdot \sin(x_1) + \frac{p_1}{2} \\ \sin(x_0) \cdot p_0 - t \cdot \cos(x_0) \cdot p_1 \\ \frac{-p_0}{x_1} \end{pmatrix},$$

since we closed up the system with condition (5),

$$\frac{dH}{du} = 0 \rightarrow u(t) = \frac{p_1}{2}.$$

Now, having the system with co-state variables and the structure of the control function it is possible to form an optimization problem for initial point of co-state variables, so the end point of the system state would be achieved at time T .

As one can see, the nonlinear differential equation consists of logarithm function, trigonometric functions and the system itself is nonstationary.

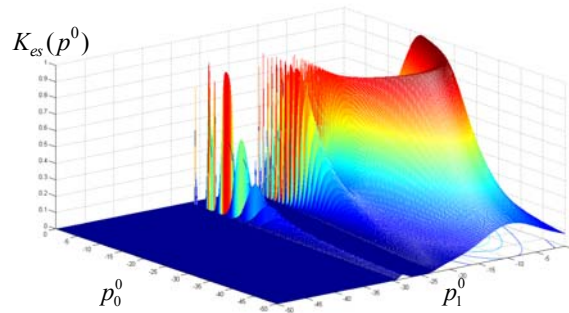


Fig. 1. The surface of the criterion (6) for optimal control problem (7)–(8)

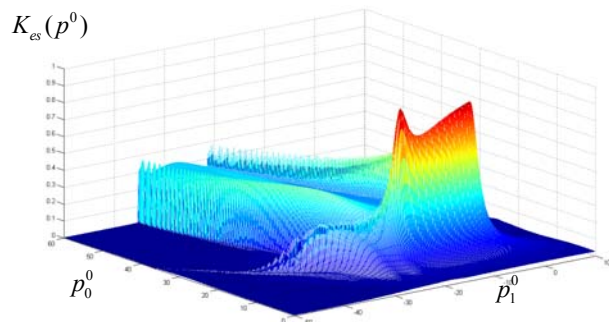


Fig. 2. The surface of the criterion (6) for optimal control problem (9)–(10)

The mapping (6) for the given problem is shown on the fig. 1. The surface was made via evaluating numerically the nonlinear differential equation for extended system, varying the initial point of the co-state variables. As it can be shown on the current surface some extremum problems that are reduced from the optimal control problems have a lot of local maximums that are less than 1 and so do not satisfy two-point problem, and among them there could be closed sets or distinct points, that delivers extremum to criterion (6) and it equals 1.

Let us describe the next optimal control problem for the plant with inverted pendulum, which movement is determined with system of nonlinear differential equation

$$f(x, t, u) = \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_1 + \sin(x_0) + u(t) \cdot \cos(x_0) \end{pmatrix},$$

$$T = 5, \quad x^0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad x^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

and functional

$$F(x, u) = u^2 + x_0 \rightarrow \min_{u, x_0}. \quad (10)$$

is being considered. Then, it is necessary to define the extended system (4),

$$F_p(x, p, t) = \begin{pmatrix} x_0 \\ -x_1 + \sin(x_0) + \frac{p_1 \cdot \cos^2(x_0)}{2} \\ -2 \cdot x_0 + p_1 \cdot \cos(x_0) - \frac{p_1 \cdot \sin(2 \cdot x_0)}{4} \\ -p_1 + p_0 \end{pmatrix},$$

because we closed up the system with condition (5),

$$\frac{dH}{du} = 0 \rightarrow u(t) = \frac{p_1 \cdot \cos(x_0)}{2}.$$

The mapping (6) for current problem is shown on the fig. 2.

Every optimal control problem reduced to extremum problem for vector function with unknown characteristics and behavior of the criterion.

As it can be seen on figures, the problem is complex. Moreover, there is no any information about the location of the extremum.

To sum up, seeking for the solution of the reduced problem, in general, is associated with the global optimization technique that works on the vector field with no constraints. Anyway, it is possible to use the optimization techniques, which works on the compact, but then the special procedure of extending the compact or switching to different one should be implemented.

Since many optimization techniques are suitable for the considered problem and deal with its features, it was suggested to compare these well-known techniques: evolutionary strategies, differential evolution and particle swarm optimization.

The main principle of evolutionary strategies (ES) is described in [8]. To provide the efficiency growth evolutionary strategies algorithm was modified. Another modification of the evolutionary strategies algorithm suggested is the CMA-ES, which is described in [9] and uses the covariance matrix adaptation. As the next

optimization technique the differential evolution (DE) algorithm is suggested, which main principle is described in [10]. The last considered method of extremum seeking is the partial swarm optimization (PSO), which is described in [11].

The random coordinate-wise real-valued genes optimization (LO) has been implemented for the algorithms performance improvement. The optimization is fulfilled in the following way. For every N_2 randomly chosen real-valued genes for N_1 randomly chosen individuals N_3 steps in random direction with step size h_i are executed.

For problems that were described above: (7)–(8), (9)–(10), we set the maximum numbers of criterion evaluation to 8000, and tested different setting of the given algorithms. The number of algorithms' iterations and the size of populations were varied too: 1600 and 5, 800 and 10, 400 and 20, 200 and 40, 100 and 80, respectively.

Since the proposed optimization techniques have different natures and their settings were varied regarding to the features of algorithms. For the evolutionary strategies techniques the selection was varied: proportional, rank, tournament; crossover operator was varied: intermediate, weighted intermediate and discrete; mutation: classical and modified, with mutation probability equals to $1/k$. For differential evolution technique the settings were chosen due to recommendation given: $C_r = 0,5$ and

$F \in \{a_i = 0,2 \cdot i : i \leq 10, i \in N\}$. For the particle swarm optimization settings were taken from the followig sets: $\omega \in \{0,5 \cdot i : i \leq 4, i \in N\}$, $\varphi_{1,2} \in \{0,4 \cdot i : i \leq 6, i \in N\}$. The initial population was randomly generated, $op_i \in N(0,10)$, $sp_i \in N(0,1)$ and $v_i \in N(0,1)$. For the ES+LO technique, the settings for LO and the number of individuals and populations were chosen as the numbers, which sum is equal to maximum number evaluation. The settings for the CMA-ES algorithm were set as it is recommended in reference, for this technique the only numbers of populations and individuals were varied.

It is important to highlight the fact of stagnation of some algorithms. For the problem (9)–(10) the average of the fitness function for every population and the fitness of the best individual are shown on the fig. 3. These curves are the averaging of the presented variables after 20 restarts of algorithms with the same settings. The horizontal axis is the number of iteration for every algorithm; vertical axis is the fitness function value. As one can see, there are many iterations made by the algorithm that gives no solution improvement. Moreover, the scouting of the surface does not give any sufficient result.

So the first problem is related with the stagnation of the algorithms, and the second important thing is reaching the global extremum point, for dissipative fitness functions. Let us compare the efficiency of algorithms for two different problems (7)–(8) and (9)–(10). In the table 1 the average values of the fitness function for the found solution are presented.

In table 2 the probability estimation of $1 - \text{fitness}(op^*) < 0.05$ is considered, since that algorithms can reach local optimum point for (9)–(10), it is easier to add one more characteristic – chances to reach the global optimum.

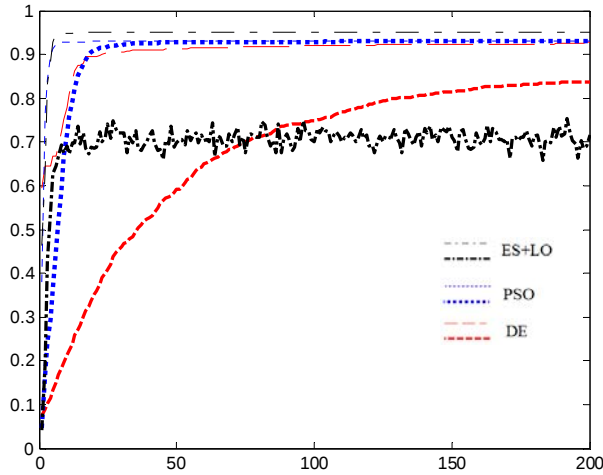


Fig. 3. Behaviour of average fitness function value and fitness of the best individual. Thick lines are the average fitness and thin lines are the best fitness

Table 1

Average values of the fitness function for different techniques with the most efficient settings

Problem	Algorithm				
	ES	DE	PSO	CMA-ES	ES+LO
(7)–(8)	0,97	0,98	0,95	0,99	0,99
(9)–(10)	0,93	0,95	0,96	0,94	0,97

Table 2

The estimation of probability to return solution that is close to the global optimum

Problem	Algorithm				
	ES	DE	PSO	CMA-ES	ES+LO
(7)–(8)	0,3	0,5	0,6	0,35	0,65

One can put forward a hypothesis about improvement of the algorithm performance via implementing the

critique, which aim would be detecting the stagnation of an algorithm. If for chosen number of populations there is no improvement of the best solution the population is being regenerated.

In the current study the following scheme was investigated:

- If last n_{tail} populations best solution is not changing, i. e. $\max(tail) - \min(tail) > boarder_{tail}$, where $tail, |tail| = n_{tail}$ is the vector of best solutions and $boarder_{tail}$ is critique parameter – algorithm is restarting;
- If algorithm is restarting, then the database is extended with new solution found: $database = database \cup best_solution$;
- If the algorithm is not restarting and $database \neq \emptyset$, then if

$$\|best_set - database_i\| < boarder_{best}, i = 1, |database|,$$

where $boarder_{best}$ is another critique parameter;

- There is also a possibility to change the expected value of the initial population distribution, i. e. $center = center + N(0, \sigma_{restart})$.

In the current investigation, all the algorithms' settings and population, individual numbers were varied. Due to given problems, the hybrid evolutionary strategies algorithm was the most effective in searching the extremum and reliable in case of the problems with objective function that have a surface as it is shown on figure 2. After all the runs, the best settings were estimated as following ones: 20 individuals for 200 populations, tournament selection (10 %), discrete crossover, modified mutation (mutation probability 0,75) and $N_1 = N_2 = N_I / 2$, where N_I is population size, $N_3 = 0.1$, with evaluations number limitation equal to 8000.

To investigate the algorithm performance two different schemes were examined: with changing of the expected value for the initial population and without it. The size of tail was varied from 5 to 20 and boarder was 0,005, 0,01, 0,05, 0,1. The examination was done on (9)–(10) problem. For every setting of the critique, the global solution was found at least once. It means that the restarting sufficiently increases efficiency of the algorithm.

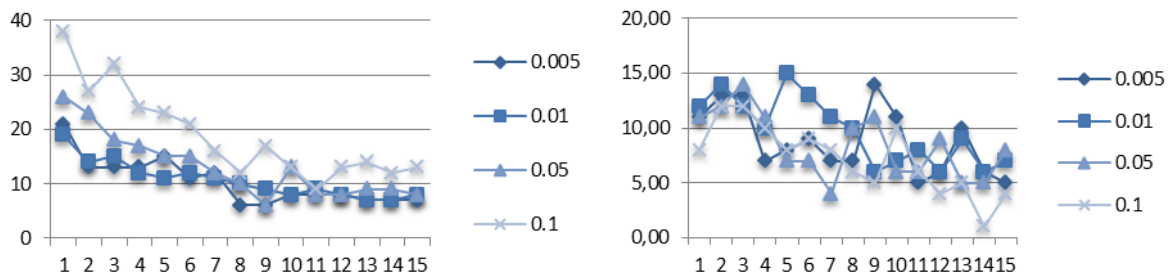


Fig. 4. Relation between the number of restarts (left) and the number of global optimum points found (right) for different boarders and tail sizes

If we compare two schemes, the sum of cases when algorithm founded global optimum point for different settings is 512 and 476 for algorithm with changing of expected value and not, respectively. The number of total runs was 796 and 819, the number of populations that was aborted because of their best solution being close to one from the set was 534 and 516, respectively. The last fact means that the checking the distance between point that was already suspected to be «final» improves the performance as well and prevent from extra evaluations. On the fig. 4 the relation between increasing of the tail size and number of restarts for different borders is on the left diagram, and number of global optimum points found for different border values and increasing of the tail size is on the right diagram. As it can be seen on the figures, there is nonlinear influence of increasing the size of the tail, but the size of the tail does change the algorithm efficiency, as well as the border size. The further study will be focused on different schemes of critique's action and detection and ways to adapt the new parameters. Anyway, even now, with the same number of function evaluation we increased the estimated probability to find the desired solution from 0.65 to 1.

References

1. Popescu M., Dumitrache M. 2005: On the optimal control of affine nonlinear systems. *Mathematical Problems in Engineering* (4): p. 465–475.
2. Chen W. H., Balance D. J., Gawthrop P. J., 2003: Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach. *Automatica* 39(4): p. 633–641.
3. Primbs J. A., Nevistic V., Doyle J. C., 1999: Nonlinear optimal control: a control Lyapunov function and receding horizon perspective. *Asian Journal of Control*, vol. 1, no. 1: p. 14–24.
4. Rao A. V., 2009: Survey of Numerical methods for Optimal Control, AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, AAS Paper 09-334, Pittsburg, PA.
5. Bertolazzi E., Biral F., Lio M., 2005: Symbolic-Numeric Indirect Method for Solving Optimal Control Problems for Large Multibody Systems: The Time-Optimal Racing Vehicle Example. *Multibody System Dynamics*, vol. 13, no. 2, p. 233–252.
6. Cruz P., Torres D., 2007, Evolution strategies in optimization problems, *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.*, 56, 4, p. 299–309
7. Kirk D. E., 1970: *Optimal Control Theory: An Introduction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
8. Schwefel H.-P., 1995: *Evolution and Optimum Seeking*. New York: Wiley & Sons.
9. Hansen N., 2006: The CMA evolution strategy: a comparing review. *Towards a new evolutionary computation. Advances on estimation of distribution algorithms*, Springer, p. 1769–1776.
10. Storn R., Price K., 1997. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11, p. 341–359.
11. Kennedy, J., Eberhart, R., 2001. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, CA.

© Рыжиков И. С., 2013

УДК 519.6

INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES IN TIME SERIES FORECASTING

E. S. Semenkin, A. A. Shabalov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: eugeneseamenkin@yandex.ru, shabalov-andrey@mail.ru

Intelligent information technologies enable to solve complex data mining problems in various domains of human activity. In this paper such popular techniques as artificial neural networks, fuzzy rule based systems and neuro-fuzzy systems are considered. A genetic programming algorithm is used for building intelligent systems ensembles in order to improve the performance and reliability of decision making. The methods proposed are applied to time series prediction task. The results obtained are compared to other state-of-the-art time series forecasting techniques.

Keywords: artificial neural networks, fuzzy rule based systems, neuro-fuzzy systems, evolutionary algorithms, ensembles of intelligent systems.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Е. С. Семенкин, А. А. Шабалов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: eugeneseamenkin@yandex.ru, shabalov-andrey@mail.ru

Интеллектуальные информационные технологии способны решать сложные задачи интеллектуального анализа данных в различных областях деятельности человека. В данной статье рассматриваются такие популярные инструменты, как искусственные нейронные сети и нейро-нечеткие системы. Алгоритм генетического программирования используется для построения ансамблей интеллектуальных информационных технологий в целях улучшения эффективности и надежности принятия решений. Предлагаемые методы апробированы на задачах прогнозирования временных рядов. Представленные результаты сравнены с другими распространенными алгоритмами прогнозирования временных рядов.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, системы на нечеткой логике, нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы, ансамбли интеллектуальных систем.

In order to control and design complex systems one has to have a model of an object (process). However, real complex system modeling is a difficult task. A simulation model can be a solution of the problem (computer simulation model of the system/object). In practice as a rule, there is a big amount of raw data of observations of the system behavior. Intelligent information technologies (IIT) enable to obtain a simulation model on short time. Having such a model it becomes possible to examine and track the properties of the simulated system what allows developing finite system model at a later date.

Intelligent systems have got a wide propagation in different fields of human activity connected with complex system modeling and optimization tasks. Evolutionary algorithms [1], fuzzy rule based systems [2], artificial neural networks [3] and neuro-fuzzy systems [4] and other techniques and technologies are of a popular school for investigation among scientists of this domain. These tools make it possible solving complex intelligent problems which are difficult to solve, or practically impossible, with classic techniques [5].

Along with single technologies, hybrid approaches are developed. Hybridization of neural networks and evolutionary algorithms (EA), fuzzy rule based systems and EA and neural networks and fuzzy systems have resulted in substantial growth of investigation in intelligent system design domain.

However, design of intelligent information technologies is a complex optimization problem whose structure considerably impedes applying of classic techniques. Moreover, solving such a problem requires substantial financial expenditure and time costs.

Genetic algorithms (GA) represent a stochastic optimization procedure based on evolution and natural selection principle. GAs have demonstrated high performance in solving practical multiextremal problem [6, 7]. Flexible parameter coding structure of a genetic algorithm enables effective applying for IIT structure design as well as tuning their parameters [8].

At the present time by virtue of computing power gain ensemble approaches become more popular in different approximation and classification tasks. It has been observed that heterogeneity of the ensemble members plays an important role in building up a terminal decision [9]. Different approaches have been proposed to maintain heterogeneity of the ensemble members. Among them, running on different feature sets [10], training sets (bagging [11] and boosting [12]). The diversity of the ensemble can be reached as well by generation of different member structures. For instance, generation of

neural networks of different structures by running on the same training and feature sets. In order to compute the ensemble output, commonly, simple and weighted averaging are used. In classification task along with aforementioned methods ranking and majority voting are used as well [13; 14].

In [15] Ramírez et. al. used Mamdani fuzzy inference system to combine outputs of several techniques (Fuzzy KNN, Multi Layer Perceptron with Gradient Descent with Momentum Backpropagation, and Multi Layer Perceptron with Scaled Conjugate Gradient Backpropagation). A genetic algorithm was applied for selection definite neural networks from pre-generated set according to the performance metrics [16]. Siwek et. al. [17] used 4 neural-like predictors (Multilayer Perceptrons (MLP), Support Vector Machines (SVM), Elman Networks, and Radial Basis Functions Networks). The obtained results were post-processed by SVM or MLP. Johansson et. al. [18] used a genetic programming method for building an ensemble from predefined number of Artificial Neural Networks. Functional set of a genetic programming algorithm consisted of averaging and multiplying and terminal set included generated neural networks models and constants.

In all abovementioned examples ensemble member structures were generated by hand by trial-and-error method.

A genetic programming algorithm [19] operates by computer programs expressed by trees structures (as a rule, by binary trees). The operation of the algorithm is similar to a genetic algorithm described above. Before the start of the running the algorithm it is necessarily to specify a functional set (collection of functions used) and a terminal set (collection of system variables, collection of constants used).

In this paper we consider applying a genetic programming algorithm for intelligent information technologies ensemble design. As opposed to Johansson et. al. work a terminal set is presented by an extended collection of elementary functions. Another peculiarity of our work consists in applying diverse intelligent systems providing by that heterogeneity of the ensemble. Moreover, neural networks, fuzzy rule based systems and neuro-fuzzy systems are generated automatically on the basis of self-adapting genetic algorithms what allows to skip expensive involvement of experts.

The article is organized as follows. In Section I the description of IIT algorithmic core generation automated methods is given. In Section II the description of IIT ensemble design procedure by means of genetic programming algorithm is presented. Numerical

experiments and performance comparing with other up-to-date techniques on time series forecasting problems are given in Section 3. In Conclusion the results of the work done and future direction of investigations are discussed.

Automated design of intelligent information technologies algorithmic core. *Artificial neural networks.* In the work a multilayer perceptron in the capacity of architecture structure of a neural network was taken as being widely spread in practical applications. While designing the architecture of a neural network the following problems occur. The choice of an architecture structure (number of hidden layers and number of hidden neurons on each hidden layer). As a rule for tuning of weights coefficients of such networks a back-propagation algorithm and its different modifications are used [20–22] which are based on gradient descent method. The drawback of such algorithms consist in: low convergence speed, noise sensitivity, algorithm performance dependency on learning heuristic step, and, as a rule, modeling error does not reach the global optimum due to function complexity [23].

To overcome such problems it is suggested to apply genetic algorithms for neural network structure generation as well as weights coefficients tuning. The detailed description of the algorithm scheme and the way of parameters coding can be found in [24].

Fuzzy rule based systems. While developing a fuzzy system an expert faces the problem of initial fuzzy rules selection a set of which could be incomplete and contradictory. While developing a fuzzy system an expert faces the problem of initial fuzzy rules selection a set of which could be incomplete and contradictory. The selection of membership functions parameters describing the input and output object parameters is carried out subjectively and may represent the reality incorrectly. Moreover, fuzzy logic systems don not have automatic learning algorithms.

Taking this into account, to improve decision making validity the genetic algorithms were applied. When designing a fuzzy system structure a Pittsburgh approach was used [25] in which single individual represents the whole rule base. The realized coding scheme of fuzzy system parameters enables to determine automatically the size of a rule base, i.e. the number of rules, as well as the length of each single rule, i. e. the number of input parameters in left part of a rule, due to the inclusion of an additional term – “don’t care” term [26]. The parameter coding schemes can found in [27].

Neuro-fuzzy systems. The generation process of neuro-fuzzy systems consists of two phases [28; 29]. The first stage (unsupervised mode) represents the initial numerical data clustering. After that the coarse fuzzy rules are determined. The second stage (supervised mode) consists in accurate tuning of the rule base derived. Usually gradient algorithms are used here the drawbacks of which are widely known and prevent effective use of neuro-fuzzy systems. Therefore, for membership functions parameters tuning the GAs were applied instead of gradient algorithms. Their performance was shown in previous works and outperformed the performance of the

steepest descent algorithm in practical problems solving in terms of modeling relative error [30]. The parameters coding scheme of neuro-fuzzy systems into a genetic algorithm strand are described in [31].

Self-adapting genetic algorithm. For intelligent information technologies structure generation and their parameter tuning a self-adapting genetic algorithm was developed based on asymptotic genetic algorithm [32]. This algorithm operates by probability distribution vector of 0 or 1 bit occurrence in respective chromosome gene. On the basis of asymptotic selection and asymptotic mutation with adaptive setting of mutation probability value [33] the following customized parameters left: type of selection, (not)applying elitism strategy. The crossover operator in explicit form is absent. The selection automation of parameters left allows to facilitate the work to a user being not an expert in evolutionary calculation domain.

The process of automatic selection of a selection type in self-adapting asymptotic genetic algorithm is carried out automatically dynamically in the course of algorithm running on the basis of parameters probabilistic mixture. Let z_k be a probability of k -th selection type applying. On every generation the probabilities are recalculated based on the following formula (in order to prevent probabilities approaching close to zero 20 percent of probability is divided equally among every parameter value):

$$z_k = z_{all} + \frac{r_k \cdot (100 - N \cdot z_{all})}{\sum_{k=0}^K r_k},$$

where K – number of values of tunable parameter;

$k = \overline{1, K}$, $z_{all} = \frac{20}{K}$ $r_k = \frac{success_k^2}{used_k}$ – ratio, where $used_k$ –

number of times when k -th operator was applied; $success_k$ – number of times of k -th operator which led to average fitness improvement of a population comparing to previous generation. Initially $used_k$ are set to 1 in order to avoid the division by zero. The scheme of this GA is similar to the asymptotic GA with the additional step of probability distribution vector recalculation of selection type [24].

The proposed techniques of IIT algorithmic core generation were successfully applied to different real-world problems solving. For conducting such experiments a program system π -IT-on was developed [34; 35]. In table 1 the list problems solved is presented. Part of them was taken from machine learning repository UCI [36].

Problems 1, 2 and 4 are of classification tasks. The rest are of approximation tasks. For every problem 20 runs were implemented for every IIT type generation. In table 2 the best results are given in terms of relative error criterion. In the table the following notations are used: Tr – the error on a training set, Ts – the error on a test set. From the table one can see that in most cases neuro-fuzzy systems outperformed other technologies. The performance of all realized intelligent systems is comparable to known results.

Table 1

Characteristics of real-world problems

Problem		Input dimension	Output dimension	Sample size	
				Training	Test
Machine learning repository UCI					
1.	Iris classification	4	3	135	15
2.	Wine classification	13	3	163	15
3.	Forest fires forecasting	12	1	477	40
4.	Satellite image classification	36	6	4435	2000
Applied problems					
5.	Turbine condition monitoring based on forecasting of vibration signals	11	12	1000	400
6.	Ore-thermal process modeling	9	1	47	10
7.	The degradation prediction of electrical characteristics of spacecraft's solar arrays	7	4	177	20
8.	Test-based characteristics forecasting of jet engine	5	1	20371	2263

Table 2

The results of real-world problem solving

№	Нейронная сеть		Система на нечеткой логике			Нейро-нечеткая система		
	Error		Error		Rule number	Error		Rule number
	Tr, %	Ts, %	Tr, %	Ts, %		Tr, %	Ts, %	
1	3,70	6,66	1,48	0	5	1,48	0	3
2	0,61	6,66	0	0	7	0	0	5
3	1,78	1,79	1,11	1,11	5	1,45	1,46	4
4	23,2	24,3	16,87	19,61	15	15,67	17,5	9
5	9,11	9,14	8,07	8,09	15	7,99	7,97	10
6	4,86	4,97	2,99	3,01	15	2,81	2,92	10
7	9,01	9,72	5,66	7,66	17	5,05	5,87	15
8	8,29	8,73	4,97	5,01	24	0,93	0,95	20

Evolutionary approach of intelligent information technologies ensemble design. In the majority of cases real-world problems are large-scale and complex for solving by a single technology. Ensembles of intelligent systems allow to incorporate different technologies for resultant decision making what enables to improve the performance and reliability of a terminal system.

In the work for effectiveness and reliability improvement of IIT it is suggested to apply the genetic programming method in order to form both IIT ensemble composition for complex problems solving and the way of cooperation of ensemble members in making the resultant decision based on particular decisions of individual technologies.

The resultant solution is comprised of mathematical expression from individual decisions of generated intelligent systems. Thus, partial decision of single technologies will be terminal set elements.

On a preliminary stage scheme it is necessary to generate and train in advance the specified number of terminal set elements which later will be used in the algorithm. In this scheme, there exist two modes of mutation realization in the genetic programming algorithm. It is possible either to choose randomly an element from the terminal set or to generate an absolutely

new intelligent system. A functional set includes mathematical expressions.

Thus, combination of individual technologies in the IIT ensemble enables to integrate the advantages of every of them and considerably to compensate their drawbacks improving in such a way the performance and reliability of the system in a whole.

There are the examples of tree coding in the genetic programming algorithm below. On fig. 1 an example of a tree genotype (on the left) and its correspondent decision in the search space is presented. The following notations are used: ANN – artificial neural network, FLS – fuzzy logic system, NFS – neuro-fuzzy system.

For described earlier list of real-world problems in Section 1 correspondent ensembles were generated. In order to build an ensemble preliminarily 10 intelligent systems of every type were generated. For instance, for ore-thermal process modeling the following formula was obtained:

$$Ni(\%) = NFS_{10} \cdot e^{\frac{FLS_6}{FLS_6 \cdot e^{NFS_9}} \cdot \frac{1}{FLS_{10}}}$$

The relative error was equal to 2,21 % on the training set and 2,33 % on the test set what is better than for every individual IIT.

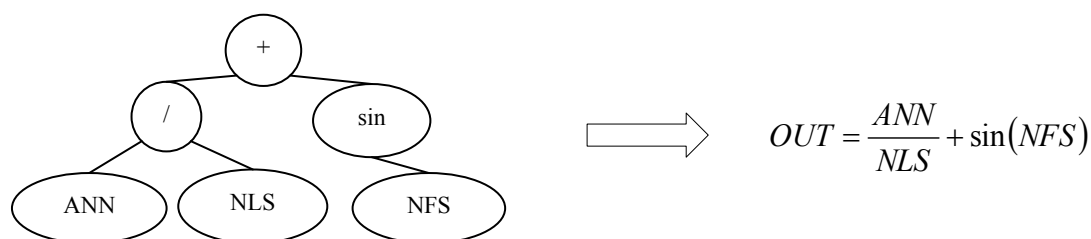


Fig. 1. Genotype and phenotype representations

In wine classification problem the following expression was got:

$$C = \sin\left(NFS_4 \cdot \sqrt{e^{NFS_{10}}}\right),$$

where C is the class number. A recognition error constituted 0 % on both training and test sets.

In table 3 a comparison with other up-to-date methods of ensemble building for the Iris classification problem is given [37]. The proposed techniques are highlighted in bold. From the table it can be seen that the ensemble allows to reach hundred-per-cent successful classification.

Table 3

Comparison with analogs

Classifiers	Error, %
Ensemble (ANN+FLS+NFS)	0,00
CROANN	1,31
SVM-best	1,40
GSOANN	3,52
NFS (weighted average)	4,11
NFS (simple average)	4,33
CCSS	4,40
NLS (weighted average)	5,06
NLS (simple average)	5,33
ANN (weighted average)	5,37
ANN (simple average)	5,66
GANet-best	6,40
ESANN	7,08
PSOANN	10,38
EPANN	12,56
SGAANN	14,20

Experimental investigation of time series forecasting problems solving. For testing of proposed IIT design algorithms on time series forecasting problems sets of data were used taken from “Synthetic Control Chart Time Series Data Set” from machine learning repository UCI [36].

These samples are synthetic tests for prediction algorithms. Four classes of time series were used for testing: normal (1), cyclic (2), increasing trend (3) and decreasing trend (4). Solving different time series types in test problems allows to estimate well the capabilities of forecasting algorithms.

Every collection contains 60 values. 57 training tuples were used to generate an ensemble. Thus, for values $x(t)$, $x(t-1)$ and $x(t-2)$ it is necessary to predict $x(t+1)$. 20 independent runs of the program were implemented. In table 4 the results obtained compared to other methods are given [38] based on average relative error calculated as follows:

$$ERROR = \frac{100 \%}{s(y_{\max} - y_{\min})} \sum_{i=1}^s |o_i - y_i|,$$

where s – the number of predicted values; $y_{\max}$ and $y_{\min}$ – maximum and minimum observed values of a time series accordingly; y_i – true value of a time series, o_i – model output.

From given table one can see that the IIT ensemble always allows to improve the performance of a resultant system. Moreover, in every case it turned out to be the best from compared techniques. Realized fuzzy rule based systems and neuro-fuzzy systems generated automatically by means of genetic algorithms proved to be better than ensemble techniques GASEN and PGNS and GPEN. Exponential smoothing has demonstrated the worst modeling quality of time series.

Conclusions. In this work the algorithms of intelligent information technologies automated design on the basis of evolutionary algorithms were considered. The algorithmic core design of neural network models, fuzzy logic systems and neuro-fuzzy systems is carried out by the means of self-adapting genetic algorithm enabling to reduce to minimum the participation of an expert.

It is shown that forming the ensemble based on partial decisions of single technologies allows to improve the performance and reliability of a resultant system.

The effectiveness of applying developed algorithms in approximation and classification tasks is shown. The perspective of proposed approaches in time series forecasting problem solving has been demonstrated.

The future work is aimed on conducting additional experiments in time series forecasting problems solving, solving other real-world problems, comparison with up-to-date data mining techniques.

Table 4

Time series test

Method	Error, %			
	(1)	(2)	(3)	(4)
Ensemble (ANN+FLS+NFS)	2,0	1,9	2,2	1,9
ANN (simple average)	22,1	12,1	14,6	8,1
NLS (simple average)	3,6	3,5	3,3	2,2
NFS (simple average)	3,2	2,8	3,1	2,5
GASEN	11,3	9,7	10,8	9,6
Exponential smoothing	19,9	29,5	19,4	18,6
PGNS and GPEN	8	6,9	8,4	7,3

References

- Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computing. Springer, Berlin, Germany, 2003.
- Yager R. R., Filev D. P. Essentials of fuzzy modeling and control. Wiley, New York, USA, 1994.
- Rojas R. Neural networks: a systematic introduction. Springer, Berlin, Germany, 1996.
- Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications. Wiley, England, 2004.
- Konar A. Computational Intelligence: Principles, techniques and applications. Springer, Berlin, Germany, 2005.
- Haupt R. L., Haupt S. E. Practical Genetic Algorithms. Wiley-Interscience, New Jersey, USA, 2004.
- Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA, USA, 1989.
- Semenkin E., Shabalov A., Efimov S. An automated design of intelligent information technologies ensembles by a genetic programming method. *Vestnik SibGAU*. 2011, № 3 (36), p. 77–81. (in Russian)
- Dietterich T. G. An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: bagging, boosting, and randomization. *Machine Learning*, 2000, vol. 40, no. 2, p. 139–158.
- Ho T. K., Hull J. J. and Srikari S. N. Decision combination in multiple classifier systems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1994, vol. 16, no. 1, p. 66–75.
- Breiman L. Bagging predictors. *Machine Learning*. 1996, vol. 24 (2), p. 123–140.
- Friedman J. H., Hastie T., Tibshirani R. Additive logistic regression: a statistical view of boosting. *Annals of Statistics*. 2000, vol. 28, no. 2, p. 337–374.
- Navone H. D., Granitto P. M., Verdes P. F., Ceccatto H. A. A learning algorithm for neural network ensembles. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. 2001, no. 12, p. 70–74.
- Kittler J., Hatef M., Duin R. P. W., Matas J. On Combining Classifiers, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20:3 1998.
- Ramírez E., Castillo O., Soria J. Hybrid System for Cardiac Arrhythmia Classification with Fuzzy K-Nearest Neighbors and Multi Layer Perceptrons combined by a Fuzzy Inference System, WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Barcelona, Spain, 2010.
- Amorim Neto M. C., Tavares G., Alves V. M. O., Cavalcanti G. D. C. and Ing Ren T. Improving Financial Time Series Prediction Using Exogenous Series and Neural Networks Committees, WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Barcelona, Spain, 2010.
- Siwek K., Osowski S. and Sowinski M. Neural predictor ensemble for accurate forecasting of PM10 pollution, WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Barcelona, Spain, 2010.
- Johansson U., Lofstrom T., König R., Niklasson L. Building Neural Network Ensembles using Genetic Programming, IJCNN '06. International Joint Conference on Neural Networks, 2006.
- Koza J. R., Genetic programming. The MIT Press, London, England, 1998.
- Hristev R. M. The ANN Book, 1998.
- Kröse B., Smagt P. An Introduction to Neural Networks, 1996.
- Wasserman P. Neural Computing. Theory and Practice. Moscow, Mir, 1984. (in Russian)
- Kasabov N. Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. The MIT Press, Cambridge, Second printing, 1998.
- Shabalov A. Automated design of intelligent information technologies ensembles in data mining problems solving. *Theory and practice of system analysis: Proceedings of II All-Russian scientific conference of young scientists*. Rybinsk: RSATA named after P. A. Solov'yev, 2012, p. 69–79. (in Russian)
- Herrera F. and Magdalena L. Genetic Fuzzy Systems: a Tutorial. CICYT, 1995.
- Ishibuchi H., Nojima Y. Analysis of interpretability-accuracy trade-off of fuzzy systems by multiobjective fuzzy genetics-based machine learning. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2007, vol. 44, no. 1, p. 4–31.
- Shabalov A., Semenkin E., Galushin P. Integration of Intelligent Information Technologies Ensembles for Modeling and Classification. Hybrid Artificial Intelligence Systems. Lecture Notes in Computer Science, Volume 7208/2012, p. 365–374.
- Castellano G., Fanelli A.M. A self-organizing neural fuzzy inference network. Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. Como, Italy, 2000, vol. 5, p. 14–19.

29. Castellano G., Fanelli A. M. Information granulation via neural network based learning. IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference. Vancouver, Canada, 2001, vol. 5, p. 3059–3064.
30. Shabalov A., Semenkin E., Efimov S. Ensembles techniques in data mining. Saarbruecken: LAMBERT Academic Publishing, 2012, 100 p. (in Russian)
31. Shabalov A., Semenkin E., Galushin P. Automatized Design Application Of Intelligent Information Technologies for Data Mining Problems. Joint IEEE Conference “The 7th Inter-national Conference on Natural Computation & The 8th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery”, Shanghai, China, p. 2659–2662 (2011).
32. Galushin P., Semenkina O., Shabalov A. Comparative analysis of two distribution building optimization algorithms. 9th International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence, Salamanca, Spain, 2012.
33. Vorozheykyn A., Semenkin E. Development and investigation of adaptive probabilistic genetic algorithm for multi-criterion conditional optimization. Proceedings of international theoretical and practical conferences “Intelligent systems” (AIS’08) and (Intelligent CAD) (CAD’08). Moscow, Fizmatlit, 2008, no. 1, p. 15–21. (in Russian)
34. Semenkin E., Shabalov A. V. An automated design system of intelligent information technologies ensembles. Program product and systems. 2012, № 4 (100), p. 51–54. (in Russian)
35. Semenkin E., Shabalov A. Program system π -IT-on for an automated design of intelligent information technologies ensembles. XIII national conference on the artificial intelligence with international participation CAI-2012: conference proceedings. Vol. 4. Belgorod: Publishing house BSTU, 2012, p. 109–116. (in Russian)
36. Frank A., Asuncion A. (2010). UCI Machine Learning Repository. Available at: <http://archive.ics.uci.edu/ml>.
37. Yu J. J. Q., Lam A. Y. S., Li V. O. K. Evolutionary Artificial Neural Network Based on Chemical Reaction Optimization. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC’2011), New Orleans, LA, 2011.
38. Bukhtoyarov V., Semenkin E., Sergienko R. Evolutionary approach for automatic design of neural networks ensembles for modeling and time series forecasting. Iadis international conference: Intelligent systems and Agents, MCCSIS, 2011.

© Семенкин Е. С., Шабалов А. А., 2013

УДК 519.8

SELF-CONFIGURING EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR TRAVELLING SALESMAN PROBLEM

O. E. Semenkina, E. A. Popov, O. E. Semenkina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: oleese@mail.ru, epopov@bmail.ru, semenkina.olga@mail.ru

This paper considers genetic algorithm (GA) and ant colony optimization algorithm (ACO) with the automated choice of operators for the travelling salesman problem solving. The choice is based on operator probabilistic rates calculated during algorithm execution. The performance comparison with other heuristics such as Lin-Kernigan heuristic (3-opt) and Intelligent Water Drops algorithm (IWDs) is fulfilled and competitive results are demonstrated.

Keywords: genetic algorithm, travelling salesman problem, ant colony algorithm.

САМОКОНФИГУРИРУЮЩИЙСЯ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА

О. Е. Семенкина, Е. А. Попов, О. Э. Семенкина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: oleese@mail.ru, epopov@bmail.ru, semenkina.olga@mail.ru

Рассматриваются генетический алгоритм (ГА) и алгоритм оптимизации на основе муравьиных колоний с автоматическим выбором операторов для решения задачи коммивояжера. Выбор основан на вероятностном ранжировании операторов в течение работы алгоритма. Представлено сравнение эффективности с другими алгоритмами, такими как алгоритм Лин-Кернигана и алгоритм интеллектуальных водяных капель, показаны соответствующие численные результаты.

Ключевые слова: генетический алгоритм, задача коммивояжера, алгоритм муравьиных колоний.

Considered way of GA self-configuration was introduced in [1] where its usefulness was demonstrated on benchmark problems and in applied problems of neural networks weights adjustment. This approach was then successfully used in solving real world optimization problems with algorithmically given functions and mixed variables [2]. This made the approach to be a candidate for the development of adaptive algorithms of combinatorial optimization. This paper considers self-configuring GA, self-configuring ACO and their application in one of the most known combinatorial optimization problem named Traveling Salesman problem (TSP). The traveling salesman problem belongs to the class of NP-complete problems, is often used to test the newly created algorithms of combinatorial optimization and it has a lot of applications in routing, scheduling and many other fields [3]. Performance of these algorithms is compared with other heuristics namely Lin-Kernighan heuristic and Intelligent Water Drops algorithm. Results of numerical experiments on benchmark problems show that suggested approach demonstrates competitive effectiveness.

Algorithms description

Lin-Kernighan heuristic. One of the classical methods for solving the traveling salesman problem is a local search [4], in particular so called k -opt algorithm (Lin-Kernighan heuristic [5]). TSP solution is presented by cyclic graph f . The k -opt neighborhood $N_k(f)$ includes all the tours which can be obtained by removing k edges from the original tour f and adding k different edges such that the resulting tour is feasible. The essence of the algorithm is to consider neighborhood of current solution. If there exists a graph g in this neighborhood with better objective function value, then g becomes current solution. The procedure is repeated as long as the current solution can be improved.

Exploring the whole $N_k(f)$ takes $O(n^k)$ operations and, thus, 2-opt and rarely 3-opt are used in practice. This paper deals with 3-opt because it is more efficient.

Intelligent water drops algorithm. Intelligent water drops algorithm (IWDs) [6] possesses a few properties of a natural water drops. The paths that a river follows have been created by a swarm of water drops. Thus, any swarm of water drops will influence the rivers path. On the other side, for a swarm of water drops, the river is the part of the environment that has an influence over it. A large influence on the movement of the river shows which type of soil and how resistant it is to the flow, as it determines the speed drops. Thus, the path of the water drops swarm depends on path of the river, type of soil and its resistance. So the formation of a natural river is the result of a competition between the water drops and the environment that resists its movement. Notice that all natural rivers are full of twists and turns. This is due to the influence of gravity which pulls the water through the path of least resistance to the lowest point.

It is assumed that each drop of water is able to transfer an amount of soil from one place to another. Furthermore, the soil is transferred from the fast parts of the river to the slow parts. This makes the fast parts deeper, allowing them to hold a greater volume of water. The quantity of

soil a water drop is able to transfer depends on its velocity. Furthermore, the velocity of a water drop depends on the amount of soil in its way. The velocity of a water drop grows faster on a path with less soil. Water drops prefer a path with the least amount of soil.

On the basis of the above properties Shah-Hosseini in 2007, proposed the Intelligent water drops algorithm [6]. Every intelligent water drop (IWD) has two important properties: the amount of soil that it carries, and its velocity. For each IWD, the values of both properties, soil and velocity, may change as the IWD flows in its environment. From the mathematical point of view, the environment is a problem for river sand swarm of water drops looking for the optimal path.

Velocity of IWD, that moves from its location i to the location j , is increased by an amount

$$\Delta vel = \frac{a_v}{b_v + c_v \cdot soil^2(i, j)},$$

where parameters a_v , b_v and c_v should be chosen as positive numbers.

IWD's soil is increased by removing some soil of the path ij . The amount of soil added to the IWD is calculated by

$$\Delta soil(i, j) = \frac{a_s}{b_s + c_s \cdot time^2(i, j; vel^{IWD})},$$

where a_s , b_s and c_s are positive parameters. Time is calculated by the simple laws of physics for linear motion.

$$time(i, j; vel^{IWD}(t+1)) = \frac{HUD(i, j)}{vel^{IWD}}$$

Local heuristic function $HUD(\cdot, \cdot)$ has been defined for a given problem to measure the undesirability of an IWD to move from one location to the next. For TSP it is calculated as follow:

$$HUD(i, j) = \|\bar{e}(i) - \bar{e}(j)\|$$

where $\bar{e}(i)$ is vector of coordinates, $\|\cdot\|$ – Euclidean metric.

Soil amount between i and j is updated by the amount of soil removed by the IWD by formula:

$$soil(i, j) = (1 - \rho_n) \cdot soil(i, j) - \rho_n \cdot \Delta soil(i, j)$$

The soil of the IWD is increased by the amount of soil as shown below:

$$soil^{IWD} = soil^{IWD} + \Delta soil(i, j)$$

The probability of choosing location j after i is proportional to the amount of the soil on the path between locations i and j and can be calculated by formula:

$$p_i^{IWD}(j) = \frac{f(soil(i, j))}{\sum_{k \in V_v} f(soil(i, k))},$$

where

$$f(soil(i, j)) = \frac{1}{\epsilon_s + g(soil(i, j))}$$

and

$$g(soil(i, j)) = \begin{cases} soil(i, j) & \text{if } \min_{l \in V_c} (soil(i, l)) \geq 0 \\ soil(i, j) - \min_{l \in V_c} (soil(i, l)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

The constant parameter ε_s is a small positive number to prevent division by zero. V_c is a list of visited nodes.

Effectiveness of the algorithm depends on many parameters. Some of them (velocity updating parameters a_v , b_v and c_v , soil updating parameters a_s , b_s и c_s , global soil updating parameter ρ_{IWD}) were fixed in our experiments according to the recommendations of the algorithm's author (1, 0.01, 1, 1, 0.01, 1 and 0.9 accordingly). However, the remaining parameters required settings for a specific task (significance of the best solution in upgrading of soil matrix α , local soil updating parameter ρ_n , initial soil on each edge of the graph $InitSoil$, initial velocity of each drop ($InitVelocity$). Each parameter can take a large number of values, but in this study we did not set ourselves the aim of fine-tuning algorithm for a specific task and therefore considered only 24 variants: $\alpha = 0.1, 0.3$ or 0.5 , $\rho_n = 0.9$ or 0.7 , $InitSoil = 1000$ or 10000 and $InitVelocity = 20$ or 200 .

Ant colony optimization algorithm. Ant colony optimization algorithm (ACO) [7] is a nature-inspired optimization meta-heuristic based on the behavior and organization of ant colonies in their search for a food. Being almost blind animals, ants anyway can find shortest path from the nest to the food. For information exchange, ants use a ferment, or more exactly pheromone, that they leave on the traversed path. The probability that the ant will choose a certain path is proportional to the amount of pheromone on it.

Solutions in ACO are represented as permutation of n cities and ants chose next city using taboo-list (list of visited cities) and pheromone matrix at every stage. ACO has some adjustable parameters: evaporation rate (ρ), relatively importance of previous search experience (α) and relatively importance of the distance between cities (β).

Pheromone trails are updated after each ant has completed a tour by formula:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij},$$

where ρ is parameter such that $(1 - \rho)$ is evaporation and

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k.$$

Here $\Delta\tau_{ij}^k$ is an amount of the pheromone that the ant k leaves on the edge ij and can be calculated by formula:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{if ant } k \text{ uses edge } ij \text{ in its tour} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where Q is a constant, L_k – length of the k -th ant tour.

Let $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ (d_{ij} is distance between i and j) be called a visibility. The probability of choosing the city j after i is a function of the distance between cities and amount of pheromone on the edge ij and can be expressed as follows

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta}, & \text{if } j \in \text{allowed}_k, \\ 0, & \text{if } j \notin \text{allowed}_k, \end{cases}$$

where allowed_k is a list of unvisited by k -th ant cities.

Some parameters, such as Q and ρ , does not significantly affect the efficiency of the algorithm, so in this paper we will consider only the parameters α and β .

Genetic algorithm. A well-known genetic algorithm (GA) [8] is based on some principals of evolution, but in the GA for the TSP a chromosome is represented as permutation of the n numbers (number of cities). That is why some standard operations have a few changes, but many adjustable parameters remain such as mutation probability, the type of selection, etc.

There are three type of selection in genetic algorithm:

1) Tournament selection (parameter is size of the tournament).

First, we select a random subset of k individuals from the population and then select the best solution out of this subset.

2) Fitness proportional selection.

The probability of the i -th individual to be selected is proportional to its fitness function value fit_i and is calculated as follows:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^m fit_j},$$

where m is a number of individuals.

3) Rank selection (linear or exponential ranking).

Individual i has rank less than individual j ($R_i < R_j$) if i -th fitness function value is less than j -th fitness function value ($fit_i < fit_j$).

3.1) Linear ranking.

Probability of the i -th individual to be selected is calculated by formula:

$$p_i = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^m R_k}, \text{ where } \sum_{k=1}^m p_k = 1.$$

3.2) Exponential ranking.

All individuals are assigned a weight according to the value of fitness function so that the best individual has weight $\omega_1 = 1$, $(k+1)$ -th individual has weight

$$\omega_{k+1} = \begin{cases} \omega_k, & \text{if } R_{k+1} = R_k, \\ \omega_k \cdot \lambda, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

where $\lambda \in [0; 1]$.

In this case probability of the i -th individual to be selected is

$$p_i = \frac{\omega_i}{\sum_{j=1}^m \omega_j}.$$

Algorithms self-configuration. All bionic algorithms have many adjustable parameters and this is a significant disadvantage because parameter tuning is a difficult task even for the specialists. Nowadays, for elimination of this defect one applies the tuning algorithm parameters during its work or, it can be said, an adaptation [9].

In this study we have investigated the adaptive GA, which had 8 different selection variants - tournament selection with size of the tournament equals 2, 4 or 8, rank selection with a linear ranking, rank selection with exponential

ranking with parameter λ equal to 0,95, 0,8 or 0,5, and fitness proportional selection. Also it had 5 different mutation variants – very low, low, medium, high and very high. Adaptive ACO had 4 different variants of parameter α and also 4 variance of parameter β , in both cases 1, 2, 5 or 10.

Variant of each operator shall be determined separately. Let z be a number of variants of operator. In our situation, for example, $z = 8$ in case of selection operator of adaptive GA. If we take a parameter of the algorithm instead of the operator, and different values of this parameter instead of operator variants, then $z = 4$ in case of parameter α of ACO. So here the essence of adaptation will be described in terms of operators and their variants.

At the beginning of the algorithm probability of selecting all the options of the operator are the same: $p = 1/z$. At each generation, the effectiveness of each operator variant is estimated in the following way:

$$averagefitness_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} f_{ij}}{n_i}, \quad i = 1, 2, \dots, z$$

where n_i is a number of individuals obtained by the i -th variant of the operator; f_{ij} is the value of the fitness function of the j -th individual obtained by the i -th variant of the operator; $averagefitness_i$ is the average value of the fitness function of individuals that were generated by the i -th variant of the operator.

Probability of the operator variant with the largest value of average fitness (i.e. the most effective) increases by $((z - 1) \cdot K) / (z \cdot N)$, while the probability of all other operator variants decreases by $K / (z \cdot N)$, where N is the number of past generations of the algorithm, K is a constant, usually equals to 2. In addition, there must be a lower bound of the probability of the operator variant as no one of its probabilities can be equal to zero. If some probability reaches lower bound, this variant stops to give its share in the benefit of the best variant. The sum of probabilities of all variants of the same operator is always equal to 1. Thus, the probability distribution of the operator variant selection is gradually displaced towards the most effective operator variant from less effective variants.

Thereby, when the algorithm has to create the next offspring from the current population, it firstly must configure settings, i.e. form the list of operators with the use of operator probability distributions. Then the algorithm selects parents with the chosen selection operator, produces an offspring with the chosen crossover operator, mutates this offspring with the chosen mutation probability and puts it into an intermediate population. When the intermediate population is complete, the fitness evaluation is executed and the operator rates (probabilities to be chosen) are updated according to the operator's productivity, i. e. the ratio of the average offspring's fitness obtained with this operator and the offspring population average fitness.

Algorithms work analysis. Algorithms performance was compared on two well-known benchmark problems Oliver30 and Eil51. To solve these problems all heuristics have got as much resource as algorithm 3-opt required on average (i. e., 52800 objective function calculations in case of Oliver30 and 342210 in case of Eil51). Results of numerical experiments averaged on 100 runs are presented in table 1.

Figure shows one example of algorithms work on Oliver30 problem in case where the better solution (423.741) was found. Here we can see some advantage in the effectiveness of ACO that may be due to the fact that it begins its work with a solution oriented on the distances between cities, but not with a completely random as other algorithms.

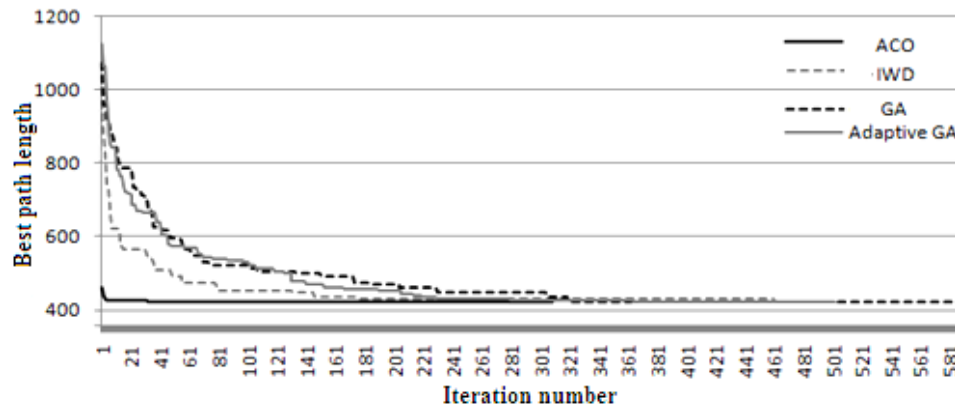
Table 1 shows that adaptive methods lose conventional with the best settings not so much. At the same time, they do not require testing many variants of parameters. Effectiveness of biology inspired algorithms on a specific task varies considerably depending on the settings.

If we solve the problem only once (that is what we actually do with real problems), the effectiveness of the algorithms will be approximately equal to the mean value on this task and not to the best value. Such a comparison on the tasks is shown in table 2, where two lines for each algorithm contain the values of the objective function, found in the best and average settings through all the settings and columns contain averaging over runs, and the standard deviation.

Table 1

Adaptive algorithms comparison with other algorithms on the tasks Oliver30, Eil51

	3-opt	IWDs	GA	Adaptive GA	ACO	Adaptive ACO
Oliver30						
best	423,741	423,741	423,741	423,741	423,741	423,741
average	428,610	425,500	432,356	434,239	423,782	426,428
std deviation	7,4740	3,7022	13,2365	13,6875	0,1675	3,7653
Eil51						
best	428,872	428,872	431,953	429,118	429,484	429,484
average	438,598	437,279	447,943	449,938	432,732	433,936
std deviation	5,0160	5,57137	7,5848	9,94143	3,11622	2,88955



Examples of the ACO, IWDs, GA and adaptive GA behavior on task Oliver30

Table 2

Adaptive algorithms comparison with other algorithms with different parameters variants on the tasks Oliver30 and Eil51

	3-opt	IWD		GA		Adaptive GA	ACO		Adaptive ACO
		best	average	best	average		best	average	
Oliver30									
Best run	423.741	423,741	423,965	423,741	424,139	423,741	423,741	428,684	423,741
Average run	434.61	426,413	434,75	431,647	442,982	434,485	424,04	443,771	426,428
Standard deviation	11.931	3,19925	10,1741	11,3784	12,8611	12,7539	0,42986	11,7151	3,7653
Eil51									
Best run	435,58	433,101	450,775	442,672	444,923	440,817	428,872	478,636	429,118
Average run	450,346	442,05	468,64	450,913	460,762	457,286	429,866	496,615	434,634
Standard deviation	8,59725	8,33447	11,6792	7,6221	10,7719	12,0611	0,74094	11,1774	3,38365

Both adaptive algorithms show good results on these problems as they outperform other algorithms with their settings giving average performance. Although on average adaptive GA cannot outperform other algorithms with their best settings and adaptive ACO cannot outperform conventional ACO with the best settings, one has to remark that we don't know beforehand which settings of the algorithm on the given task will be the best. There are 16 variants of ACO and 24 variants of GA and IWDs that means much extra efforts for the determination of these "best" algorithms before they could win adaptive GA. One can use the part of these efforts to improve results of the adaptive GA or adaptive ACO.

Besides, if we deal with real-world problems, possible situation is the best settings absence. It means that there are different best settings in the different steps of problem solving. In such cases self-configuring algorithms bring much more advantages.

Conclusion. In this paper we compared performance of some heuristic algorithms of combinatorial optimization,

such as 3-opt algorithm, intelligent water drops algorithm, conventional genetic algorithm and conventional ant colony algorithm with self-configuring (adaptive) genetic and ant colony algorithms.

Our investigations demonstrate that adaptive algorithms are the effective methods of optimization with the remarkable property, which consists in the fact that the user does not have to adjust parameters but can have competitive results in solution quality.

As a future work plans, it can be comparison with other algorithms, development of adaptive versions of other algorithms and using suggested approach for solving real world problems.

References

1. Semenkin E., Semenkina M. 2012. *Self-Configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator*. Tan Y., Shi Y., Ji Z. (Eds.): Advances in Swarm Intelligence, ICSI 2012, Part 1, LNCS 7331, Springer, Heidelberg, 414–421.

2. Semenkin E., Semenkina M. 2012. *Spacecrafts' Control Systems Effective Variants Choice with Self-Configuring Genetic Algorithm*. In: Ferrier, J.-L., Bernard, A., Gusikhin, O. and Madani, K. (eds), Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, vol. 1, p. 84–93.
3. Davendra D. (ed.) 2010. *Traveling Salesman Problem, Theory and Applications*. InTech.
4. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. 1982. *Combinatorial Optimization. Algorithms and Complexity*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
5. Lin S., Kernigan B.W. 1973. *An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem*. Operations Res. 21, p. 498–516.
6. Shah-Hosseini, H. 2007. Problem solving by intelligent water drops. *Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Swissotel The Stamford, Singapore, p. 3226–3231.
7. Dorigo M., Gambardella L. M. 1997. *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, p. 53–66.
8. Eiben A. E., Smith J. E. 2003. *Introduction to evolutionary computing*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
9. Schaefer R., Cotta C., Kołodziej J., Rudolph G. 2010. *Parallel Problem Solving from Nature*. PPSN XI 11th International Conference, Kraków, Poland, p. 11–15.

© Семенкина О. Е., Попов Е. А.,
Семенкина О. Э., 2013

УДК 004.93

EMOTION RECOGNITION AND SPEAKER IDENTIFICATION FROM SPEECH

M. Yu. Sidorov¹, S. G. Zablotkiy¹, W. Minker¹, E. C. Semenkin²

¹Ulm University

43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany

E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de, sergey.zablotkiy@uni-ulm.de, wolfgang.minker@uni-ulm.de

² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru

The performance of spoken dialogue systems (SDS) is not perfect yet, especially for some languages. Emotion recognition from speech (ER) is a technique which can improve the SDS behavior by finding critical points in the human-machine interaction and changing a dialogue strategy. Inclusion of the speaker specific information, by conducting the speaker identification procedure (SI) at the set up of ER task could also be used in order to improve the dialogue quality. Choosing of both appropriate speech signal features and machine learning algorithms for the ER and SI remain a complex and challenging problem. More than 50 machine learning algorithms were applied in the study for ER and SI tasks, using 9 multi-language corpora (Russian, English, German, and Japanese) of both acted and non-acted emotional utterance recordings. The study provides the results of evaluation as well as their analysis and future directions.

Keywords: emotion recognition from speech, speaker identification from speech, machine learning algorithms, speaker adaptive emotion recognition from speech.

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СПИКЕРА ПО РЕЧЕВЫМ СИГНАЛАМ

М. Ю. Сидоров¹, С. Г. Заблотский¹, В. Минкер¹, Е. С. Семенкин²

¹Университет города Ульма

Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна 43. E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de, sergey.zablotkiy@uni-ulm.de, wolfgang.minker@uni-ulm.de

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий» 31

E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru

Производительность диалоговых систем, основанных на естественном языке, по-прежнему находится на достаточно низком уровне, особенно для некоторых языков. Распознавание эмоций на основе речевого сигнала представляет собой подход, способный улучшить качество работы таких систем посредством определения критических точек в диалоге между человеком и компьютером и последующей адаптации диалога. Использование процедуры идентификации улучшает качество распознавания эмоций на основе речевого сигнала пользователя, так как становится возможным построение моделей эмоций конкретного человека. Выбор подходящих параметров речевых сигналов и алгоритма моделирования для задач идентификации говорящего и распо-

знания эмоций остаются важными проблемами. Более 50 алгоритмов машинного обучения были применены к задачам на 9 речевых корпусах различных языков (русского, английского, немецкого и японского). В используемых корпусах содержатся как реальные эмоции, так и постановочные диалоги актеров. Приведены результаты применения алгоритмов для обеих задач и их анализ.

Ключевые слова: распознавание эмоций и идентификация говорящего по речевым сигналам, алгоритмы машинного обучения, адаптивная процедура распознавания эмоций по речевым сигналам.

Nowadays, SDSs are included into car navigation systems, mobile devices and personal assistants and, thus, getting more and more popular. However, there are some problems which prevent the widespread using of such technologies. Firstly, one of the most important parts of SDSs is a speech recognition component, which provides the mapping between the speech signal and texts on the natural language, is not able to provide the ideal recognition accuracy. Secondly, some ambiguity is provided by the dialogue manager (DM) component. Therefore, the end-users are often disappointed or even angry while using such SDSs.

We have suggested here to use the additional information about the dialogue to improve its quality. Speaker specific information, through the speaker identification procedure, as well as gender specific information, through the gender identification from speech, and information about emotional state of a user, through emotion recognition from speech, could improve the performance of SDSs.

The solid line blocks in Figure 1 shows the baseline cycle of SDSs execution. In each turn the user communicates with the application. Recognized speech from a user comes to the DM block. The response of the system is sent back to user by a speech synthesis block. The proposed techniques are demonstrated with the dash lines in Figure 1. Emotion specific information comes to dialogue manager, which makes a decision about the user satisfaction and adapts a dialogue strategy if needed.

We have focused here on the speaker identification and the emotion recognition procedures. The solution to

such problems depends completely on the machine learning algorithms used for the modeling. We have applied more than 50 algorithms for solving these problems in order to figure out which algorithms should be used in real world applications. All evaluations were conducted on 9 different speech corpora to obtain representative speech samples and more objective results.

This paper is organized as follows: the used corpora and speech signal features are described in section 2; section 3 briefly describes the used machine learning algorithms; evaluation results as well as their analysis are shown in section 4; finally, there are some conclusion and direction for the future work in the 5th section.

Corpora Description and Feature Extraction. All evaluations were conducted using several speech databases. Here are their brief description and statistical characteristics.

Emotion recognition databases. *Berlin emotional database* [1] was recorded at the Technical University of Berlin and consists of labeled emotional German utterances which were spoken by 10 actors (5 f). Each utterance has one of the following emotional labels: neutral, anger, fear, joy, sadness, boredom and disgust.

Let's Go emotional database [2–4] comprises non-acted English (American) utterances which were extracted from the SDS based bus-stop navigational system. The utterances are requests to the system spoken by real users of this system. Each utterance has one of the following emotional labels: angry, slightly angry, very angry, neutral, friendly and non-speech – critical noisy recordings or just silence.

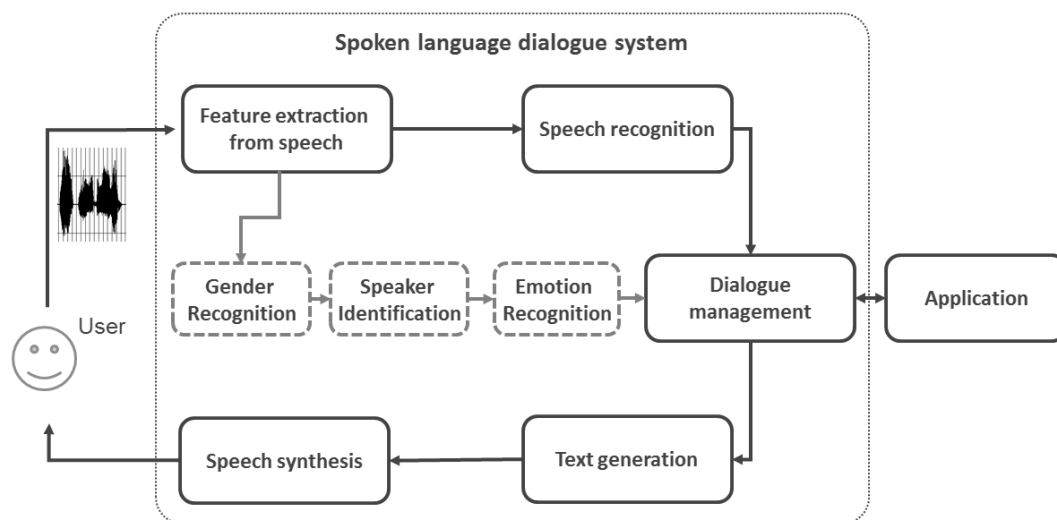


Fig. 1. SDSs execution cycle

SAVEE (Surrey Audio-Visual Expressed Emotion) corpus [5] was recorded as a part of an investigation into audio-visual emotion classification, from four native English male speakers. Emotional label for each utterance is one of the standard set of emotions (anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise and neutral).

UUDB (The Utsunomiya University Spoken Dialogue Database for Paralinguistic Information Studies) database [6] consists of spontaneous Japanese speech through task-oriented dialogue which was produced by 7 pairs of speakers (12 f), 4737 utterances in total. Emotional labels for each utterance were created by 3 annotators on the 5-dimensional emotional basis (interest, credibility, dominance, arousal and pleasantness). To produce the labels for classification task we have used just pleasantness (or evaluation) and arousal axis. The corresponding quadrant (counterclockwise, starting in positive quadrant, assuming arousal as abscissa) can also be assigned emotional labels: happy-exciting, angry-anxious, sad-bored and relaxed-serene [7].

VAM-Audio database [8] was created at the Karlsruhe University and consists of utterances extracted from the popular German talk-show “Vera am Mittag” (Vera at afternoon). The emotional labels of the first part of the corpus (speakers 1-19) were given by 17 human evaluators and the rest of the utterances (speakers 20–47) were labeled by 6 annotators on the 3-dimensional emotional basis (valence, activation and dominance). The emotional labeling was done in a similar way to the UUDB corpora, using valence (or evaluation) and arousal axis.

Emotions itself and their evaluations have subjective nature. That is why it is important to have at least several evaluators of emotional labels. Even for humans it is not always evident to make a decision about an emotional label. Each study, which proposed an emotional database, provides also an evaluators confusion matrix and statistical description of their decisions.

Speaker identification databases. *Domian database.* Originally, it is a German radio talk-show [9] where people talk to a moderator about their private troubles. We have prepared a database based on the utterance extraction from these talk-show recordings. The collection of the data is still ongoing and by now it contains the utterances of 59 speakers.

The ISABASE-2 corpus [10] used in our work is one of the largest high-quality speech database of Russian and is normally used for Russian speech recognition [11] but we have used it to evaluate the speaker identification models as well. It was created by the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Science with the support of the Russian Foundation of Fundamental Research in collaboration with a speech group of the Philological Faculty of Moscow State University and consists of more than 34 hours of clear, high-quality utterances spoken by 110 speakers (55 f).

The recording of the *PDA Speech Database* [12] was done at the Carnegie Mellon University using a PDA device. Each of 16 native speakers of American English reads about 50 sentences.

VAM-Video Database is a part of VAM-Corpus [8] has no emotional labels but still can be used to evaluate a speaker identification approaches. The number of speakers is 98.

The statistical description of the databases is in the tables 1 and 2.

Note, that the emotional databases were used for both ER and SI problems.

Feature extraction. The choice of the appropriate speech signal features for both problems is still an open question [13], nevertheless in this study the most popular ones have been chosen.

Table 1

Speaker identification corpora

Database	Language	Full length (min.)	Number of speakers	File level Duration		Speaker level Duration	
				Mean (sec.)	Std. (sec.)	Mean (sec.)	Std. (sec.)
Berlin	German	24,7	10	2,7	1,02	148,7	40,5
Domian	German	235,6	59	6,1	5,1	239,6	80,9
Isabase	Russian	2053,6	110	4,8	1,06	1120,1	278,3
Let's Go	English	118,2	291	1,6	1,4	24,3	33,04
PDA	English	98,8	16	7,09	2,4	370,6	50,7
SAVEE	English	30,7	4	3,8	1,07	460,7	42,2
UUDB	Japanese	113,4	14	1,4	1,7	486,3	281,3
VAM-Audio	German	47,8	47	3,02	2,1	61,03	33,03
VAM-Video	German	75,7	98	3,1	2,2	46,3	35,6

Table 2

Emotion recognition corpora

Database	Number of emotions	Emotion level Duration		Notes
		Mean (sec.)	Std. (sec.)	
Berlin	7	212,4	64,8	Acted
Let's Go	5	1419,5	2124,6	Non-acted
SAVEE	7	263,2	76,3	Acted
UUDB	4	1702,3	3219,7	Non-acted
VAM-Audio	4	717,1	726,3	Non-acted

Average values of the following speech signal features were included into the feature vector: power, mean, root mean square, jitter, shimmer, 12 MFCCs and 5 formants. Mean, minimum, maximum, range and deviation of the following features have also been used: pitch, intensity and harmonicity (37-dimensional feature vector for one speech signal file, in total). The Praat [14] system has been used in order to extract speech signal features from wave files.

We have applied each algorithm in a static mode, i. e. each speech signal was parameterized by a single 37-dimensional feature vector consisting of corresponding average values.

Machine Learning Algorithms. A number of different algorithms were applied for both tasks in order to figure out which ones should be used to produce appropriate results in real world applications. This section provides short description of the used algorithms.

One may group the used algorithms into the following clusters: tree based modeling, artificial neural networks, Bayesian modeling, Gaussian modeling, instance based algorithms, rule based approaches, models based on the different fitting functions, support vector modeling and fuzzy rules.

Decision tree based algorithms. Such kind of models is based on a tree-like graph structure. The main advantages of such models are that they could be understandable for people and properly explained by Boolean logic. The majority types of decision trees based on recursive procedure, where on each iteration the entropy of every attribute using the data set is calculated; the data set is split into subsets using the attribute for which entropy is minimum; a decision tree node containing that attribute is created and recourse on subsets using remaining attributes. The standard ID3, C4.5 and M5 algorithms for decision tree building as well as the tree structure with logistic regression (LMT) and naïve Bayes classifiers (NBTree) at its leaves, in addition a random tree and a forest of random trees model were applied for ER and SI problems.

Rule based algorithms based on transformation from decision trees to rules. The most of such models grow the decision tree and produce logic rule from the best leaf. The baseline RIPPER algorithm for the growing rules, the hybrid algorithm of the decision table and Naïve Bayes classifier (DTNB) as well as the C4.5 and M5 rule growing algorithms were used in the study.

Artificial Neural Networks is a class of algorithms based on structural and functional modeling of human brain. Such algorithms are capable to solve difficult tasks of modeling, prediction and recognition. The state-of-the-art multi-layer perceptron (MLP) and neural networks designed by evolutionary algorithms (AutoMLP) were applied for the classification tasks.

Bayesian modeling algorithms based on the Bayesian theorem. The simple Naïve Bayes classifier and Naïve Bayes classifier with a kernel function as well as Bayes Network were applied to the problems.

Support Vector Machine (SVM) is a supervised learning algorithm based on a construction of a hyper plane or set of hyper planes in a high- or infinite- dimensional

space. These models can be used for a classification, regression and other tasks.

Function fitting is a class of algorithms assumes that a model has some structure and the main task is to figure out the appropriate parameters of that structure. For instance, the linear regression model assumes that a data set is linearly separable in the feature space. A multinomial logistic regression is also based on the logistic function and generalizes a simple logistic regression by allowing more than two discrete outcomes. These algorithms as well as the Pace regression were applied for the modeling. The PLS classifier is a wrapper classifier based on the PLS filters which is able to perform predictions.

Lazy (or instance based) algorithms use only instances from a training set to create a class hypothesis of unknown instances. Basically they use different types of distance metrics between already known and unknown samples to produce a class hypothesis. The well-known k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm uses the Euclidian metric, whereas the K-Star algorithm uses the Entropic based metric.

Fuzzy rule algorithms based on fuzzy logic and linguistic variables. This approach has a number of advantages, because they could deal with uncertainty, noisy and subjective data. It also could take a subjective experience into account. In this study Mixed Fuzzy Rule Formation algorithm was used for numeric data labeling.

Note, that some of the used algorithms can deal only with binary labels or could provide just regression procedure. Well-known one-against-all approach has been applied in the first case and classification by regression procedure (max of corresponding output) in the second one.

In order to evaluate the performance of the described algorithms the following systems were exploited: Weka [15], RapidMiner [16] and KNIME. Some additional algorithms were implemented in C++ and MATLAB programming languages from scratch.

Evaluation Results. This section demonstrates evaluation results. All data from each corpus had been parameterized before they were split into training and test partitions (0,7 vs. 0,3 correspondingly). The best algorithm for the ER task was the Gaussian Process (the highest average recognition accuracy over all corpora) which slightly outperformed decision tree with logistic regression at its leaves. The logistic regression, PLS classifier, linear regression and multi-layer perceptron also achieved a high value of recognition accuracy (see fig. 2).

The five best algorithms for the speaker identification task (see fig. 3) were multi-layer perceptron (the highest average identification accuracy over all corpora), decision trees with logistic regression at its leaves, functional trees, neural networks designed by evolutionary algorithm and k-nearest-neighbors algorithm.

Conclusions and future work. The study has revealed the most appropriate algorithms for emotion recognition and speaker identification tasks from speech. Evaluations have been conducted using cross-corporal and multi-language approach so the results can be assumed to be representative.

It is evident that the classification accuracy strongly depends on the amount of speech data for each class. Therefore, a high level of accuracy was achieved for the PDA and SAVEE corpuses and the low one for the VAM-Video and Let's Go databases (see *Number of classes* and *Class level duration* columns for the corresponding corpora in table 1 and table 2).

In the study we have used one average feature vector for each speech signal (machine learning algorithm applications in the *static* mode). Such approach has some advantages and the main one is the execution time of a feature extraction procedure. Using this approach, such procedures like the ER and the SI can be deployed in real time.

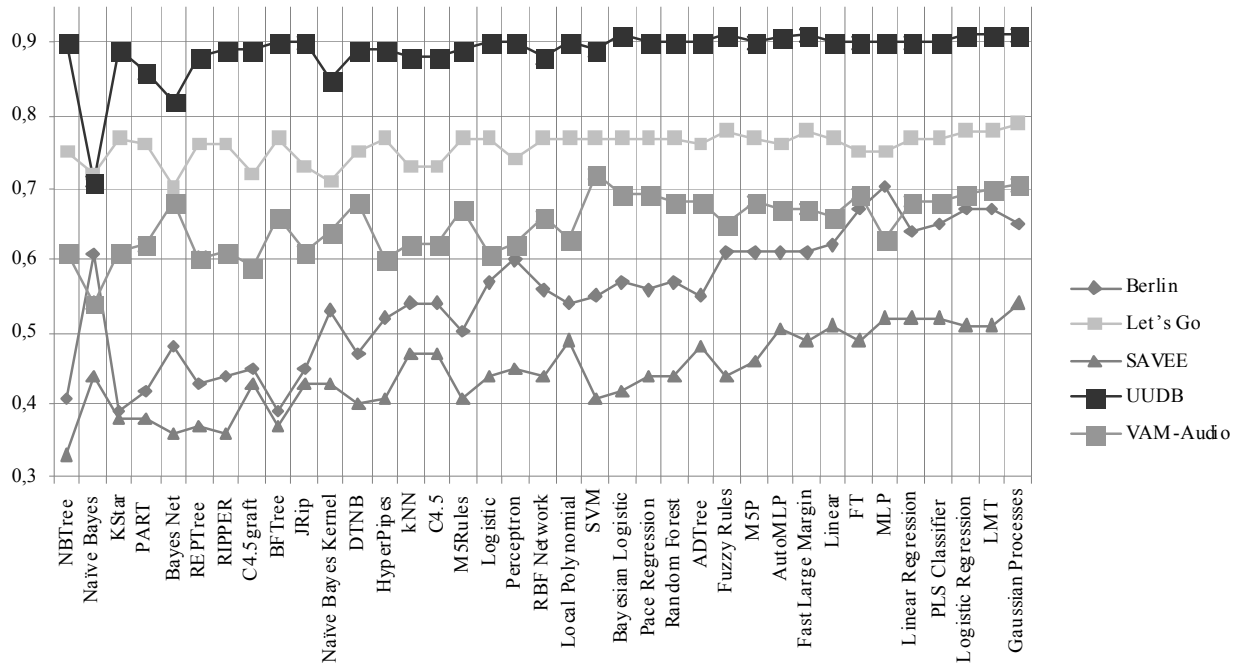


Fig. 2. Emotion recognition accuracy over all corpora

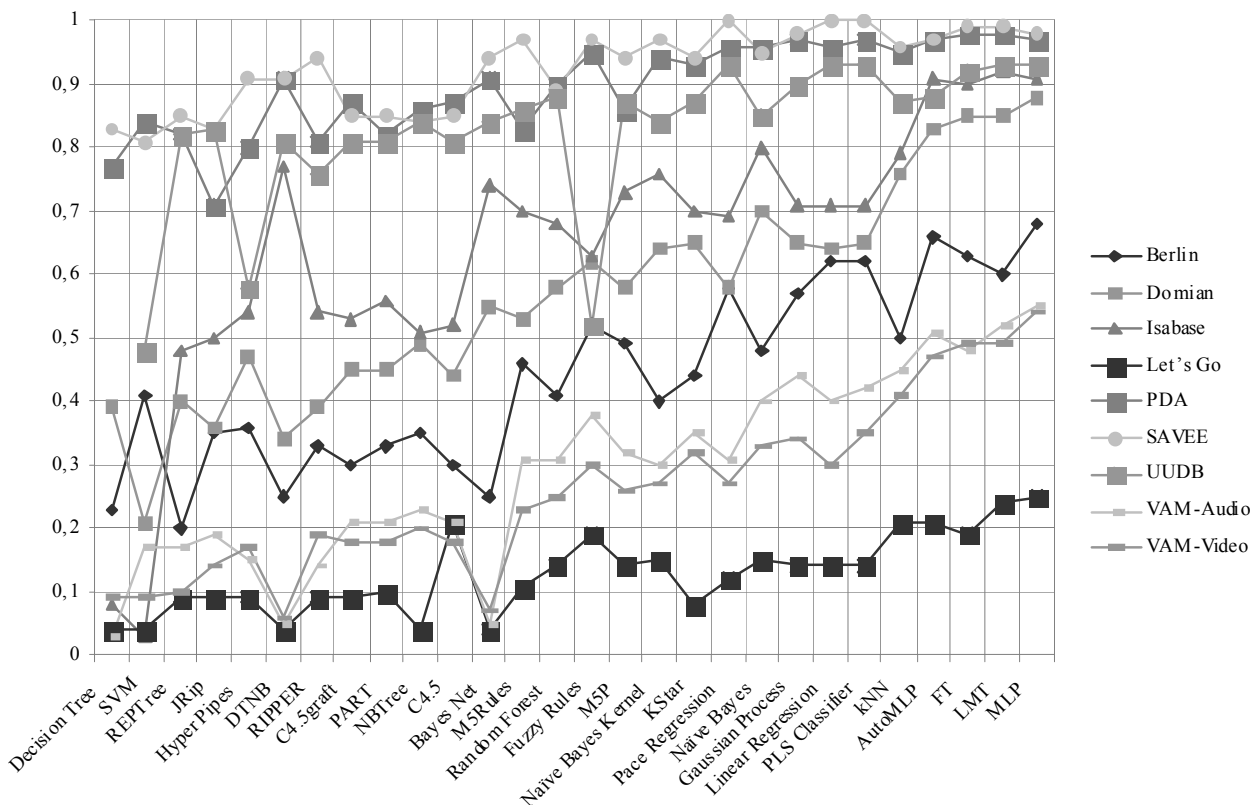


Fig. 3. Speaker identification accuracy over all corpora

Our future direction is the investigation of the machine learning algorithm applications in the *dynamic* mode. In this case the feature vectors are extracted consequently every short period of time (for example each 0,01 sec.). Moreover, speaker specific and gender specific information should be used in order to improve the emotion recognition accuracy from speech. The emotion recognition accuracy (as well as a SDS's performance in general) might be significantly improved by training of the speaker specific emotional models and using gender specific information as well. The next step is the exploitation of the best algorithms for emotion recognition and speaker identification from speech in order to build a speaker dependent emotion recognition systems.

References

1. Burkhardt F., Paeschke A., Rolfes M., Sendlmeier W., & Weiss B. (2005, September). *A database of German emotional speech*. In Proc. Interspeech (Vol. 2005).
2. Maxine Eskenazi, Alan W Black, Antoine Raux, and Brian Langner. *Let's Go Lab: a platform for evaluation of spoken dialog systems with real world use* In Proceedings of Interspeech 2008 Conference, Brisbane, Australia.
3. Alexander Schmitt, Benjamin Schatz and Wolfgang Minker. *Modeling and predicting quality in spoken human-computer interaction*. In Proceedings of the SIGDIAL 2011 Conference, Association for Computational Linguistics, 2011.
4. Schmitt A., Heinroth T. and Liscombe J. *On No-Matches, NoInputs and BargeIns: Do Non-Acoustic Features Support Anger Detection?* Proceedings of the SIGDIAL 2009. Conference, Association for Computational Linguistics, London, UK, 2009, p. 128–131.
5. Haq S. and Jackson P. J. B. *Multimodal Emotion Recognition*. In W. Wang (ed), Machine Audition: Principles, Algorithms and Systems, IGI Global Press, ISBN 978-1615209194, chapter 17, 2010, p. 398–423.
6. Available at: <http://uudb.speech-lab.org/>.
7. Schuller B., Vlasenko B., Eyben F., Rigoll G., & Wendemuth A. (2009, November). *Acoustic emotion recognition: A benchmark comparison of performances*. In Automatic Speech Recognition & Understanding, 2009. ASRU 2009. IEEE Workshop on, p. 552–557.
8. Michael Grimm, Kristian Kroschel, and Shrikanth Narayanan. *The Vera am Mittag German Audio-Visual Emotional Speech Database*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Hannover, Germany, 2008.
9. Available at: <http://www.einslive.de/sendungen/domian/>.
10. Bogdanov D. S., Bruhtiy A. V., Krivnova O. F., Podrabinovich A. Ya. and Strokin G. S., 2003. *Organizational Control and Artificial Intelligence, chapter Technology of Speech Databases Development (in Russian)*, p. 448. Editorial URSS.
11. Zablotskiy S., Shvets A., Sidorov M., Semenko E. and Minker W. *Speech and Language Resources for LVCSR of Russian*. In Proceedings of the LREC 2012, Istanbul.
12. Available at: <http://www.speech.cs.cmu.edu/databases/pda/README.html>.
13. Sidorov M., Schmitt A., Zablotskiy S. and Minker W. *Survey of Automated Speaker Identification Methods*. In Proceedings of Intelligent Environment 2012, Athens, Greece. In Press.
14. Boersma Paul & Weenink David (2013). Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version 5.3.50, retrieved 21 May 2013 from <http://www.praat.org/>.
15. Mark Hall, Eibe Frank, Geoffrey Holmes, Bernhard Pfahringer, Peter Reutemann, Ian H. Witten (2009). The WEKA Data Mining Software: An Update; SIGKDD Explorations, vol. 11, Issue 1.
16. Mierswa, Ingo and Wurst, Michael and Klinkenberg, Ralf and Scholz, Martin and Euler, Timm. *YALE: Rapid Prototyping for Complex Data Mining Tasks*. In Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-06), 2006.

© Сидоров М. Ю., Заблоцкий С. Г.,
Минкер В., Семенкин Е. С., 2013

УДК 519.6+004.9

TWO-STEPS SYSTEM IN SEARCHING SIMILAR WORDS FOR FAST AND RELIABLE AUTOMATIC CONCATENATION OF RUSSIAN SUB-WORD UNITS

A. Spirina¹, S. G. Zablotskiy², M. Yu. Sidorov²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: s_nastia@mail.ru

²Ulm University
43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany.
E-mail: sergey.zablotskiy@uni-ulm.de, maxim.sidorov@uni-ulm.de

In this paper we describe and investigate the two-steps system sorting out inappropriate words in searching of similar words in the lexicon for automatic concatenation of Russian sub-word units. This two-steps system consists of com-

puting the Levenshtein distance on the first stage and computing the similarity coefficient by the relevance function on the second stage. We also compared the performance of the Wagner-Fisher algorithm and the suggested algorithm SAWT.

Keywords: fuzzy search algorithm, Levenshtein distance, relevance function.

ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ПОИСКА СХОЖИХ СЛОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ И НАДЕЖНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНКАТЕНАЦИИ СЛОГОВ РУССКОЙ РЕЧИ

А. Спирина¹, С. Г. Заблочный², М. Ю. Сидоров²

¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: s_nastia@mail.ru

² Университет города Ульма
Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна, 43
E-mail: sergey.zablotskiy@uni-ulm.de, maxim.sidorov@uni-ulm.de

Описывается и исследуется двухуровневая система отбора наиболее подходящих слов в поиске схожих слов по словарю для автоматической конкатенации слогов русской речи. Эта система состоит из вычисления расстояния Левенштейна на первом этапе и вычисления коэффициента сходства с помощью функции релевантности на втором этапе. Мы также сравнили эффективность алгоритма Вагнера–Фишера и предлагаемого алгоритма SAWT.

Ключевые слова: алгоритм нечеткого поиска, расстояние Левенштейна, функция релевантности.

The lexicon for Russian continuous speech recognition is much larger than that for English. This fact complicates the use of standard well developed approaches to language modeling. Quite a common approach to handle an abundant lexicon is the employment of sub-units, like syllables or morphemes. The challenge of such approach is the subsequent concatenation of recognized sub-unites.

There exist some related works done to solve this problem such as [1]. However, further improvement of the concatenation accuracy and the performance of the algorithms are required.

Continuous speech is transformed into the sequence of syllables, but word boundaries are unknown. The task is to accelerate the automatic concatenation of Russian sub-word units. For this purpose the Genetic Algorithm (GA) can be used. However, the likelihood of the sentence generated by GA should be estimated. The problem can be partly solved by accelerating the search for the same and similar words from the lexicon to the words from GA by exploiting the fuzzy search algorithms.

Fuzzy search. Spell-checkers and different web search engines (such as Google, Yandex, etc) are also based on the fuzzy (string) search algorithms. For example, the fuzzy search algorithms are used in the web search engines to generate the results of the “Did you mean ...” suggestion list [2].

The problem of the fuzzy search can be formulated as follows: “Find in the text or lexicon of size N all the words matching the original word within the maximum K possible differences” [2].

There exist different fuzzy search algorithms, such as: linear search, bitap (Shift-Or or Baeza-Yates-Gonnet, and its modifications by Wu and Manber), Signature Hashing Method and others [2].

Fuzzy search algorithms are based on some metric, i. e. distance function between two strings, which measures their similarity or difference. One of the most well-known metrics is the Levenshtein distance.

The Levenshtein distance and the Wagner-Fisher algorithm. The Levenshtein distance (edit distance) between two strings is the minimum number of single-character edits (insertion, deletion, substitution) required to transform one string into the other. [3]

Suppose S_1 and S_2 are strings, then, mathematically, the Levenshtein distance can be described by the following formula (1):

$$D_{i,j} = \begin{cases} 0, & i = 0, j = 0 \\ i, & i > 0, j = 0 \\ j, & i = 0, j > 0 \\ \min(D_{i,j-1} + 1, D_{i-1,j} + 1, D_{i-1,j-1} + C_{\text{substitution}}), & i > 0, j > 0 \end{cases}$$

$$C_{\text{substitution}} = \begin{cases} 1, & \text{if } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Different sources suggest $C_{\text{substitution}}$ to be equal to 2 instead of 1 in the formula (1). In the following tests $C_{\text{substitution}} = 2$ was used.

There exists a set of algorithms for computing the Levenshtein distance. Most popular algorithm is the Wagner-Fisher algorithm [4]. In this work the Wagner-Fisher algorithm was used, in which $C_{\text{substitution}}$ is presented by formula (2):

$$C_{\text{substitution}} = \begin{cases} 2 * \text{WeightFunction}(S_1[i], S_2[j]), & \text{if } S_1[i] \neq S_2[j] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Weight Function is the function of weight coefficients for the symbol comparison. This function provides a set of rules for the phonetic comparison. It measures the phonetic similarity between two words.

To accelerate the performance the lexicon is stored in one single tree. The Levenshtein distance is computed at each node of the tree.

But the Wagner-Fisher algorithm has some drawbacks. This algorithm applied to the tree can sort out appropriate words at the beginning of the tree.

The algorithm of search appropriate words in a tree.

The algorithm SAWT was developed to accelerate the search for the similar words from the lexicon and to overcome drawback of the Wagner-Fisher algorithm described above.

The ASAWT is worthy of using only if the maximum allowed distance between strings is rather small (here distance is the measure of difference), for example 2 or 3. This algorithm is able to overcome the disadvantage of the Wagner-Fisher algorithm.

The idea of the ASAWT is as follow:

First of all, suppose that:

1. The maximum allowed distance between two strings is k .

2. S_1 of size n is the original string and S_2 of size m is the test string. Furthermore, there is a restriction for n and m : $|n - m| \leq k$ (this restriction saves the computational load while searching).

3. A value of the position p in the original string is known (starting from $p = 0$ corresponding to the first index in the string).

4. A value of the error err is known (starting from $err = 0$).

Then the mechanism of the distance computation between two strings consists of the following steps:

1. Denote i^{th} character of the string S by $S[i]$ and $j = 0$.

2. $p_s = \begin{cases} i - p, & \text{if } \exists i \in [p, p + k]: S_2[j] = S_1[i]; \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases}$

3. $p = \begin{cases} p + p_s + 1, & \text{if } p_s \neq -1; \\ p, & \text{otherwise.} \end{cases}$

4. $err = \begin{cases} err + p_s, & \text{if } p_s \neq -1; \\ err + 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$

5. If $err > k$, then stop the computation. It means that S_1 and S_2 are different.

6. $j = j + 1$

7. If $p < n$ AND $j < m$, then go to the step 2.

8. $err = err + n - p + m - j$.

If $err \leq k$ the strings are decided to be similar, otherwise the strings are different.

For example, suppose S_1 is "TRUST" and S_2 is "TEST", $k = 1$ (left table) and $k = 3$ (right table).

It should be mentioned that the cost for insertion, deletion is 1 and for substitution is 2 like in the Wagner-Fisher algorithm with formula (2), but without exploiting of WeightFunction.

Similarity coefficient. To get more appropriate results two-step system sorting out inappropriate words from the lexicon was applied.

At the first step the Levenshtein distance between the original word (generated by the GA) and the words from the lexicon is computed. At the second step the similarity coefficient between the original word and the word from the lexicon is computed by the Relevance function.

The similarity coefficient is the fractional number between 0 and 1, 0 means that two words are absolutely different, 1 means that two words are identical.

There exist different word similarity coefficients, such as the Sørensen coefficient, the Kulczynsky coefficient, the Ochiai coefficient, the Szymkiewicz-Simpson coefficient and Braun-Blanquet coefficient [5]. These coefficients reflect the similarity coefficient dependence on the length of the words.

For example, the formula (3) presents the Sørensen coefficient:

$$K_s = \frac{2c}{a + b}, \quad (3)$$

where a and b are the lengths of the words, c is the number of the matching characters, which can be computed by the formula (4) where for computing the Levenshtein distance (LD) the cost for all edit operations is equal to 1.

$$c = \max(a, b) - LD. \quad (4)$$

The Relevance function. The Relevance function gives the similarity coefficient which allows to take into account the positions of the difference in the word. Thus the difference at the beginning or at the end of the word is less critical than in the middle of the word [6].

The similarity coefficient in this case can be computed by the formula (5) and formula (6):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r(i)}{N}; \quad (5)$$

$$r(i) = \frac{Match(Str1, Str2, i) + Match(Str2, Str1, i)}{Count(Str1, i) + Count(Str2, i)}, \quad (6)$$

where $Match(S_1, S_2, i)$ is the number of the matches for all substrings of the length i from the string S_1 in the string S_2 ; $Count(Str, i) = (len(Str) - i + 1)$; $len(S)$ is the length of the string S .

For the following tests the Relevance function with $N = 2$ was used.

Certain threshold should be specified for the R to distinguish between similar and non-similar words.

Results. The computer program for testing was written in C++ using Microsoft Visual Studio 2010. The lexicon consists of 2311465 words. All tests were calculated by the computer with Intel(R) Core(TM)2 CPU 6700 @ 2.66GHz, running Linux. All results are dependent on the program realization, the characteristics of the computer, the computer workload, the words for the test and the lexicon. For testing the words of different size were randomly selected from the lexicon. The results of testing are presented in the following figures.

ASAWT for computing the distance

	T	R	U	S	T	Err
T	1					0
E		0	0			1
S		0	0			2
T						2 (err > k, stop)
Distance						–

	T	R	U	S	T	Err
T	1					0
E		0	0	0	0	1
S		0	0	1		3
T					1	3
distance						3

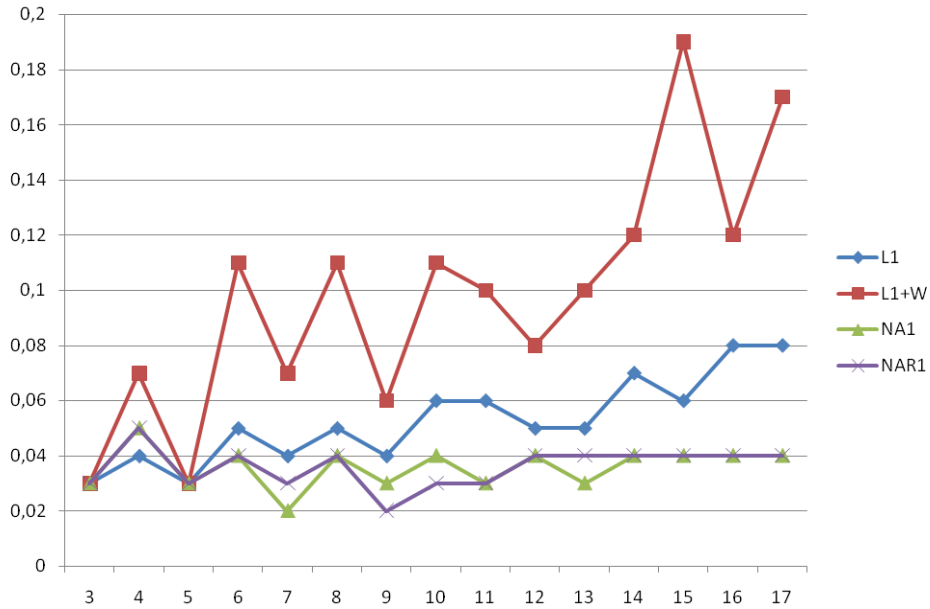


Fig. 1. Computational time for the algorithms with $k = 1$

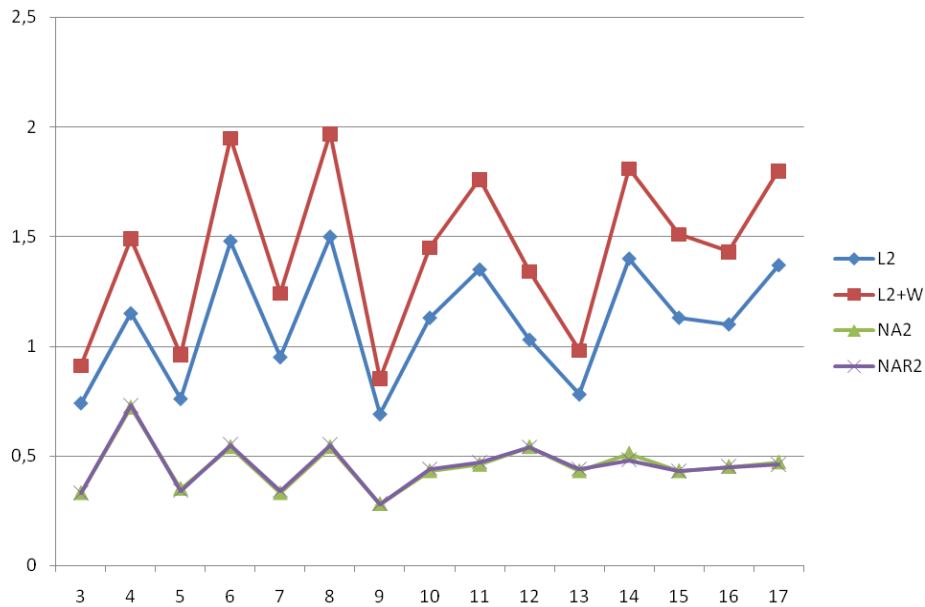


Fig. 2. Computational time for the algorithms with $k = 2$

Abbreviations on the figures:

L1, L2 mean the computation of the Levenshtein distance using the Wagner-Fisher algorithm without WeightFunction, with $k = 1$ and $k = 2$ correspondingly.

L1+W, L2+W mean the computation of the Levenshtein distance using the Wagner-Fisher algorithm with WeightFunction, with $k = 1$ and $k = 2$ correspondingly.

NA1, NA2 mean the computation of the Levenshtein distance using the ASAWT without the Relevance function, with $k = 1$ and $k = 2$ correspondingly.

NAR1, NAR2 mean the computation of the Levenshtein distance using the ASAWT with the Relevance function, with $k = 1$ and $k = 2$ correspondingly.

Computational time for 100 runs of algorithm in seconds is on the vertical axis, the length of the original words is on the horizontal axis.

Conclusion. To sum it up, from the figures above it could be seen that the ASAWT with and without relevance function works faster than the Wagner-Fisher algorithm. The final lists of similar words are almost identical. The two-step system allows to keep the accuracy at the same level.

However, the algorithm has some drawbacks, namely there are no weights modeling the closeness of the pronounced sounds. This problem is supposed to be solved in a future work.

Acknowledgements. This work is partly supported by the DAAD (German Academic Exchange Service).

References

1. Zablotskiy S., Shvets A., Sidorov M., Semenkin E. and Minker W. Speech and Language Resources for LVCSR of Russian. International Conference on Lan-

guage Resources and Evaluation (LREC), Istanbul, Turkey, 2012. May.

2. Smetanin N. (2011, March 24). Fuzzy string search. *Nikita's blog. Search algorithms, software development and so on*. Retrieved July 30, 2013, from <http://ntz-develop.blogspot.ru/>.

3. Levenshtein V. I. 1966. Binary Codes Capable of Correcting Deletions, Insertions and Reversals. *Soviet Physics Doklady*, 10, February.

4. Wagner R. A., Fischer M. J. The string-to-string correction problem. *J. ACM*. 1974, vol. 21, № 1, p. 168–173.

5. Wikipedia. Similarity index (coefficient). *Wikipedia. The free encyclopedia*. Retrieved July 30, 2013, from <http://ru.wikipedia.org/> (in Russian).

6. Karakhtanov D. S. Using of fuzzy search algorithm in processing of data for credit institutions. Audit and financial analysis. 2010, vol. 2 (in Russian).

© Спирина А. В., Заблоцкий С. Г.,
Сидоров М. Ю., 2013

УДК 519.6

SELF-ADJUSTED EVOLUTIONARY ALGORITHMS BASED APPROACH FOR AUTOMATED DESIGN OF FUZZY LOGIC SYSTEMS

V. V. Stanovov, E. S. Semenkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

A new approach to form a fuzzy logic system with evolutionary algorithms is introduced. Several algorithms were implemented as programs, efficiency measurements were made with and without self-adjustment. A new data representation method was developed for fuzzy rules base coding in genetic programming method by using reverse polish notation principle. The genetic algorithm was adapted to adjust linguistic variables semantics. The efficiency of developed algorithm was shown and compared to analogies on several test regression problems and real classification problems.

Keywords: genetic algorithms, genetic programming, self-adjustment, fuzzy logic system design.

САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМ НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ

В. В. Становов, Е. С. Семенкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: nihilanht@mail.ru, eugenesemenkin@yandex.ru

Представлен новый подход для формирования систем на нечеткой логике эволюционными алгоритмами. Несколько алгоритмов были реализованы в качестве программ, проведены измерения эффективности с самонастройкой и без таковой. Был разработан новый метод представления данных для кодирования нечетких правил в генетическом программировании на основе принципа обратной польской записи. Генетический алгоритм был адаптирован для настройки семантики лингвистических переменных. Эффективность разработанного алгоритма была показана в сравнении с аналогами на некоторых тестовых регрессионных задачах и практических задачах классификации.

Ключевые слова: генетический алгоритм, генетическое программирование, самонастройка, проектирование систем на нечеткой логике.

Fuzzy logic systems are a type of intellectual information technologies and for today they are used widely a variety of problems. Among them, there are car speed control systems, handwritten text recognition systems, robots control systems and different data analysis problems. But using them even more widely is difficult because their forming process takes a lot of time and human resources. So, developing algorithms that would allow us to form such systems automatically will help to increase the efficiency of using and the availability of such systems.

Fuzzy logic systems are also very useful as they represent knowledge as rules, which are commonly easy to understand for a human. And that is why most of the times they are formed by experts, i.e., using their knowledge. But knowledge extraction procedure may not get hidden expert knowledge, and this is one of the disadvantages of such an approach.

Automatic fuzzy logic system forming is formulated as an optimization problem, i.e., choosing some optimal rules base in terms of an efficiency criterion. Solutions representation in computer memory is also a difficult algorithmic and computational problem.

The genetic programming is a method for these problems solving. It has the flexible data representation using graphs, and it allows choosing the best solution automatically. Still, it has several disadvantages, for example, the necessity for optimal setting of genetic operators. The algorithm's efficiency depends on the set of genetic operators used, and for every research problem this combination of genetic operators may be different. To choose the best operators, several self-adjustment methods can be used.

But forming a fuzzy logic rules base is not enough to form a fuzzy system. Defining linguistic variables and their semantics is also necessary. The linguistic variables are used in the fuzzy logic systems to determine the fuzzy values (terms) like "weak", "medium" and "strong". Basically, the number of terms and their position is determined by experts, but this definition may be not ideal. To adjust the position of terms, a self-adjusted genetic algorithm can be used.

The first part of the paper describes the genetic algorithm, the second deals with genetic programming, and the third describes the fuzzy logic systems generating algorithm.

Self-adjusted genetic algorithm. To test the efficiency of self-adjustment methods, a standard genetic algorithm (GA) was developed and implemented separately. The operators of this algorithm are presented in table 1.

Let's consider two self-adjustment methods [1]: Population-Level Dynamic Probabilities (PDP) and Individual-Level Dynamic Probabilities (IDP). These methods were developed to adjust mutation type in genetic programming algorithm.

The main idea of PDP method is that operator's probabilities depend on success of their application. So, after every genetic operator application the fitness of the obtained offspring is compared to parents' fitness. If the

fitness increased, the operators applied receive a reward, i.e., their application probabilities increase. New probabilities depend on the success rates, number of operators used and are calculated as following:

$$p_i = p_{all} + \left[\frac{r_i \cdot (100 - n \cdot p_{all})}{scale} \right],$$

$$r_i = \frac{success_i^2}{used_i}, p_{all} = \frac{20}{n}, scale = \sum_{j=1}^n r_j.$$

Table 1

Groups of genetic operators for GA

Operator groups	Selection	Crossover	Mutation
Operators	Proportional Rank Tournament	Single-point Two-point Uniform	Weak Average Intensive

Here $success_i$ is the number of successful i -th operator applications; $used_i$ is the number of operators' applications. Also, there can be different success rates. For example, if the offspring is better than both parents, then it is clearly successful ($success = success + 1$), and if it is better than only one parent, then it is partly successful ($success = success + 0.5$); if it is worse than both parents, then it is unsuccessful ($success$ values does not change).

The IDP method was described so that it can only be applied to choose the mutation type. It was modified to choose the crossover type. The essence of the method is that every individual in the population has several counters cnt_j^i that show the number of unsuccessful applications of operator i for individual j . These values are used to calculate the probabilities:

$$p_i = p_{all} + \left[\frac{(\max_{1 \leq k \leq n} cnt_j^k + 1 - cnt_j^i) \cdot (100 - n \cdot p_{all})}{n \cdot (\max_{1 \leq k \leq n} cnt_j^k + 1) - \sum_{k=1}^n cnt_j^k} \right],$$

$$p_{all} = \frac{20}{n}, n \text{ is the number of operators, } m \text{ is the operator number.}$$

As this method requires one or two parent individuals, it cannot be used to choose the selection type. I.e., the probabilities needed to choose the operator depend on the individuals we use, and so to be able to apply IDP scheme, there should be at least one individual. Before the selection process, we do not know which cnt values to take. Taking cnt values from a random individual from the population is not good, because of the idea that every individual has its own cnt values.

So, when the IDP method is used to choose the crossover and mutation types, the PDP method is used to choose the selection type. Moreover, the same as for PDP method, there should be a way to differ the operators' success. So, if the offspring is worse than parents then $cnt_j^i = cnt_j^i + 1$; if it is worse than one of them then cnt_j^i does not change, and if it is better than both parents then $cnt_j^i = 0$.

After the calculation, the p_i values are mapped into interval $(0,1)$. p_{all} value is the minimum value and to is needed to make the worst operator using probability not

Table 2

Groups of genetic operators for GP

Operator groups	Selection	Crossover	Mutation
Operators	Proportional Rank Tournament	Standard Single-point	Point Growing

become zero, because in this case the operator will not be used at all.

The self-adjustment efficiency was measured in comparison to conventional genetic algorithm with all parameter combinations (45 combinations as there were five selection types used, including three tournament selections with tournament sizes equal 2, 5 and 9). The test functions used are complex for standard optimization methods. They have lots of local optima, plateaus, and global optima within them.

The reliability value was used to determine the efficiency of all algorithms; it was measured as the ratio of number of cases when the algorithm found the goal with certain accuracy to the number of algorithm runs (100 runs for every parameter combination). The results of all methods performance on one test function is presented on figure 1. For all other test functions these results look approximately so as well. The aver. GA reliability is calculated as an arithmetical mean of all reliabilities measured at every parameters combination. As can be seen from the graph, both self-adjustment methods show nearly the same reliability, and they are much better than the average genetic algorithm. Still, the best combination of parameters for the selected test function gives higher reliability value than self-adjusted GA. As a result, we may say that the presented self-adjustment methods are effective and can be used to choose genetic operators during the algorithm execution on the problem in hand.

Self-adjusted genetic programming. Genetic programming (GP) [2] has the same problems with operators used. So, the same self-adjustment methods can be applied to it. To see if these methods are efficient with genetic programming, the algorithm was implemented separately to solve symbolic regression problems.

The symbolic regression problem is finding an optimal mathematical equation, which can be used to approximate some numerical dependence between several variables. These equations can be used to solve regression and classification problems. They consist of the following operations (functional set): $+$, $-$, $*$, $/$, $\sin$, $\cos$, $\tan$, atan , $\ln$, sqr , pow and include input variables and constants as terminal set. An example of symbolic equation is:

$$(5 * X) * \sin(Y) + (Y + 1) * \cos(X).$$

Coding such equations in computing memory requires building trees, as $+$, $-$, $*$, $/$, pow are binary operations. To ease this coding, a reverse polish notation principle was used, in which the operands stand before the operation sign. Such data representation allows to code equations into strings without brackets. An example of symbolic equation in reverse polish notation is:

$$5X * Y \sin * Y1 + X \cos * + .$$

Also such an implementation allows accessing any part of the equation without going through the entire tree and avoids often problems with the computer memory allocation and cleanup. The only problem with reverse polish notation is that subtrees extraction procedures are more complex and take more time during crossover and mutation.

Two self-adjustment methods – PDP and IDP can be applied in this case without changes.

The fitness function for GP also includes penalties that depend on the equation length and number of variables used in it. The algorithm was tested to approximate the same test functions, used for genetic algorithm testing. So, finding the exact solution is hardly possible. In the figure below the error values on each of these functions are compared for different GP algorithms.

Same as for the genetic algorithm, the self-adjustment procedure allows overcoming the efficiency of average algorithm, and is a little worse, than the algorithm with the best combination of parameters.

Genetic programming for fuzzy logic systems forming. The genetic programming algorithm for forming fuzzy logic systems uses the Pittsburgh approach for forming rule bases, i.e., it forms complete rule bases, not separate rules. The rule bases are presented as trees, as shown at figure 3. The selection operator does not change in this case, while the crossover operator cannot use the root as a point for crossover unlike standard GP.

The root of the tree means logical operation “or”, and it combines different rules. Every subtree of the root is a separate rule. The nodes within every subtree of the root can be from terminal or functional set. If the node is from the functional set, it means the logical operation “and”, combining parts of the rule. If the node is from the terminal set, it is a part of the rule, and says “if variable x equals y ”. A combination of such parts forms a rule. The fuzzy inference value is kept in the functional or terminal node, connected to the root.

So this tree codes the following rules (read from left to right):

If $x1=1$ and $x2=1$ then $output=1$;
 If $x3=2$ then $output=3$;
 If $x1=2$ and $x2=3$ and $x3=3$ then $output=2$;
 If $x3=1$ then $output=3$;
 If $x2=2$ and $x1=3$ then $output=1$.

This coding allows forming compact rule bases with needed number of rules and low memory requirements. The same as for standard GP, here selection, crossover and mutation operations can be applied. The only one difference is that the root of the tree cannot be the crossover point.

The second part of forming a fuzzy logic system is adjusting the linguistic variables semantics. This includes determining terms position, but not the number of terms.

The algorithm was tested on several test functions, the same as genetic programming for solving symbolic regression problem. The comparison of errors obtained on every function is shown at fig. 4. The self adjustment procedure used for fuzzy GP is PDP.

As one may see, the algorithms have different behavior on different functions, but their overall efficiency is close enough.

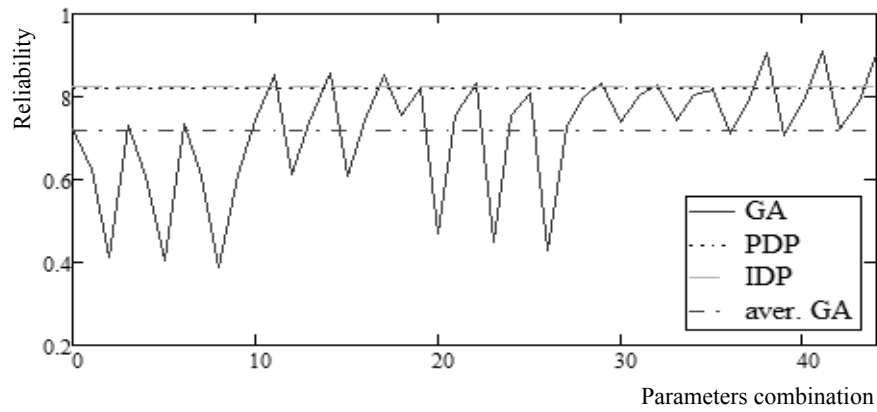


Fig. 1. Standard GA reliability compared to self-adjusted GA reliability

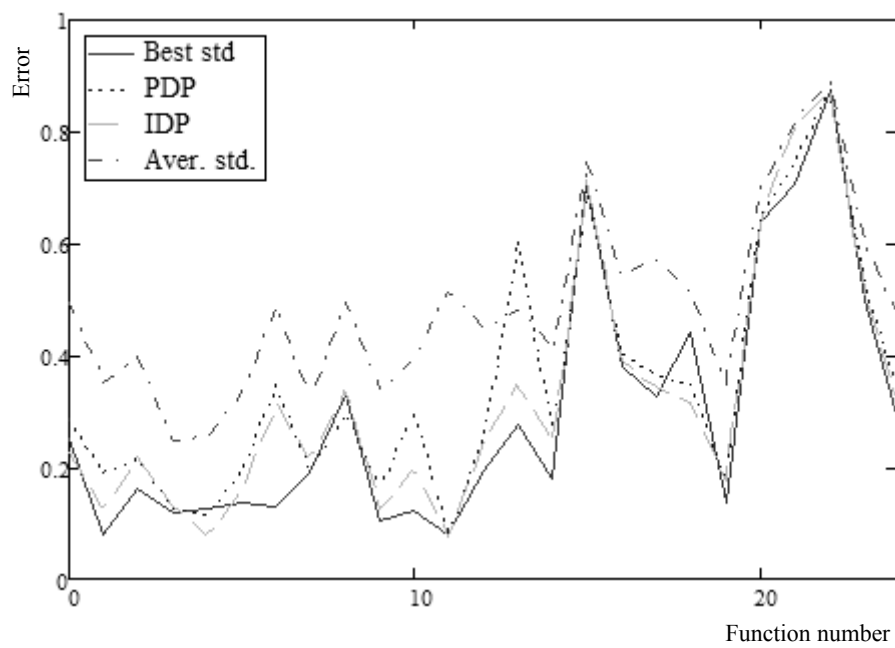


Fig. 2. Standard GP error compared to self-adjusted GP errors

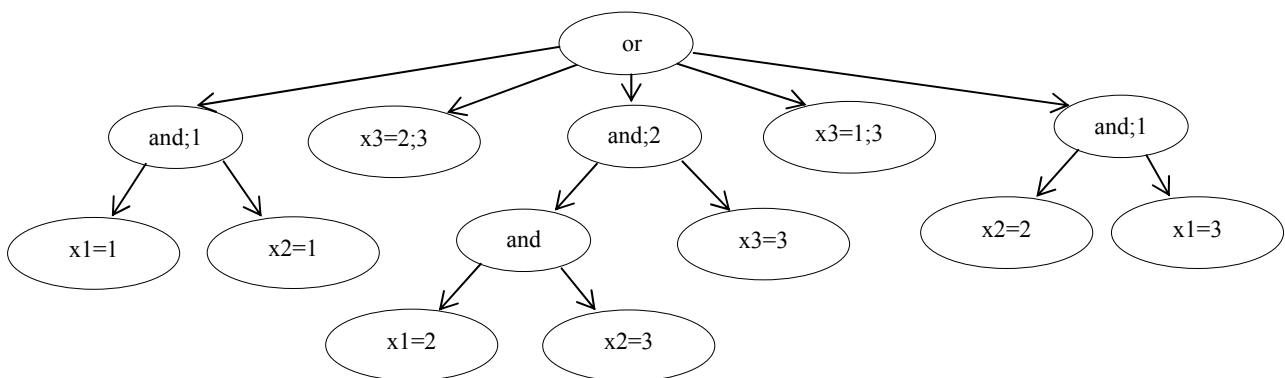


Fig. 3. Rules base representation

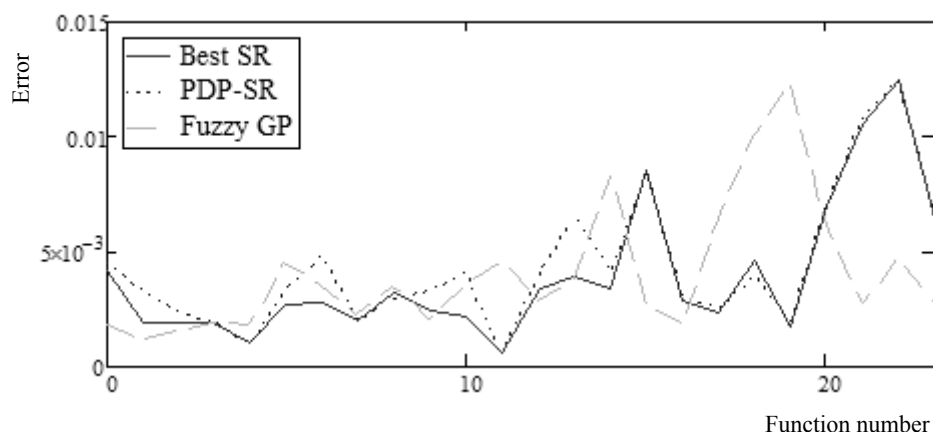


Fig. 4. Comparison of symbolic regression (SR) GP and fuzzy logic forming GP

Table 3

Comparison of different methods [3] solving classification problems

Algorithm name	Australian credit	German credit	Algorithm name	Australian credit	German credit
SCGP	0,9022	0,7950	Bayesian approach	0,8470	0,6790
MGP	0,8985	0,7875	Boosting	0,7600	0,7000
2SGP	0,9027	0,8015	Bagging	0,8470	0,6840
GP	0,8889	0,7834	RSM	0,8520	0,6770
Fuzzy classifier	0,8910	0,7940	CCEL	0,8660	0,7460
C4.5	0,8986	0,7773	CART	0,8744	0,7565
LR	0,8696	0,7837	MLP	0,8986	0,7618
k-NN	0,7150	0,7151	GP	0,8960	0,7693
GP RPN	0,8960	0,7550	Fuzzy GP	0,9010	0,7750

Several real classification problems were solved to compare the algorithm efficiency with analogies. They are:

- Bank clients classification problem, Australian variant, 14 attributes, 2 classes, sample size is 690. Classes and variables meanings are encrypted;

- Bank clients classification problem, German variant, 24 attributes, 2 classes (bad or good customer based on statistical data), sample size is 1000.

For every problem the algorithm was run several times. The average correct classification rates are shown at table 3 (higher is better). The presented algorithm name is Fuzzy GP.

The resulting algorithm has one of the highest efficiencies comparing to competitors. It also is better than the symbolic regression algorithm, which was also tested and has the name GP RPN. Although there are methods with lower error values, they form a symbolic regression which is hard to interpret, while the presented method gives a rules base which is easy to analyze for people.

Conclusions. As a result of this work, a new approach for fuzzy logic systems design was presented. This approach uses evolutionary algorithms with original self-

adjustment procedures, which allow automatic choice of most suitable genetic operators. The data representation in genetic programming allows forming small and effective rule bases. The linguistic variables adjustment procedure increases the algorithm efficiency by choosing term positions. All of these advantages give the algorithm an opportunity to compete with the best known algorithms while solving complex classification problems.

References

1. Niehaus J., Banzhaf W. Adaption of Operator Probabilities in Genetic Programming. In: Miller J. et al. (Eds.): EuroGP 2001, LNCS 2038, p. 325–336, 2001.
2. Koza J. Genetic Programming. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1998.
3. Semenkina E., Semenkina M. Self-Configuring Genetic Programming Algorithm with Modified Uniform Crossover. In: Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, 2012.

© Становов В. В., Семенкин Е. С., 2013

УДК 004.5

INTERACTION QUALITY: A REVIEW

S. Ultes, W. Minker

Ulm University

43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany

E-mail: stefan.ultes@uni-ulm.de, wolfgang.minker@uni-ulm.de

Automatically deriving the quality of a Spoken Dialogue System is an important task for both assessing dialogue systems and improving them. Work on automatic quality estimation for each system-user-exchange further holds the opportunity of using this quality information for online-adaption of the dialogues. The Interaction Quality paradigm is the first metric holding those features. Hence, this contribution gives an overview over the Interaction Quality paradigm and reviews recent estimation approaches. Furthermore, it renders drawbacks of the current approaches and proposes further directions in order to improve the estimation accuracy.

Keywords: spoken dialogue systems, dialogue assessment, machine learning.

КАЧЕСТВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ОБЗОР

Ш. Ультес, В. Минкер

Университет города Ульма

Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна, 43

E-mail: stefan.ultes@uni-ulm.de, wolfgang.minker@uni-ulm.de

Автоматическое извлечение качества речевой диалоговой системы является важной задачей как для оценки диалоговых систем, так и для их улучшения. Работа автоматической оценки качества для каждого обмена между системой и пользователем даёт возможность использования информации о качестве для адаптации диалога в режиме реального времени. Парадигма качества взаимодействия – это первая метрика, которая может содержать такие свойства. Дается обзор парадигмы качества взаимодействия и существующих подходов к оценке качества. Далее рассматриваются недостатки существующих подходов и предлагаются направления для дальнейшего улучшения процесса оценки качества взаимодействия.

Ключевые слова: речевая диалоговая система, оценка диалога, машинное обучение.

Spoken Dialogue Systems (SDSs) play a key role in designing a human-machine interface to be natural as speech is one of the major channels of human communication. Assessing the quality of such SDSs has been discussed controversially in recent years. First work on deriving subjective metrics automatically has been performed by Walker et al. [1] resulting in the PARADISE framework, which is the current quasi-standard in this field. Briefly explained, a linear dependency is assumed between dialogue parameters and user satisfaction to estimate qualitative performance on the dialogue level.

As PARDIES does not allow for exchange-level quality measures, Schmitt et al. introduced a new paradigm called Interaction Quality (IQ) [2]. Based on interaction parameters, a statistical model is created to derive IQ automatically for each exchange. By that, it is possible to use the quality information for automatic adaption in spoken human-machine dialogues [3]. In this contribution, we will present an overview of work using IQ recognition. Furthermore, we will discuss the different approaches and propose future directions.

In Section 2, the initial work by Schmitt et al. is presented defining Interaction Quality. Following that, Section 3 presents further work on automatic recognition

of Interaction Quality including a controverse discussion. Finally, Section 4 concludes by outlining important future directions.

Interaction Quality. Information about the quality of the interaction between humans and an SDS may be used for several purposes. Besides using it to compare different systems, it may also be used for improving the dialogue design itself. PARADISE provides quality values on the dialogue level which allows for general optimization of the dialogue in an offline fashion. Unfortunately, this paradigm is not usable for online dialogue optimization where the dialogue system adapts to the current quality of the dialogue. Ultes et al. [3] identified several requirements for a quality metric to be suitable for the task of automatically deriving the quality of an ongoing dialogue using statistical classification approaches. Among those requirements are, e.g., exchange level quality measurement and automatically derivable features. The Interaction Quality (IQ) paradigm introduced by Schmitt et al. [2] offers both. It is based on features which are derived from the three dialogue system modules Automatic Speech Recognition (ASR), Natural Language Understanding (NLU), and Dialogue Management (DM).

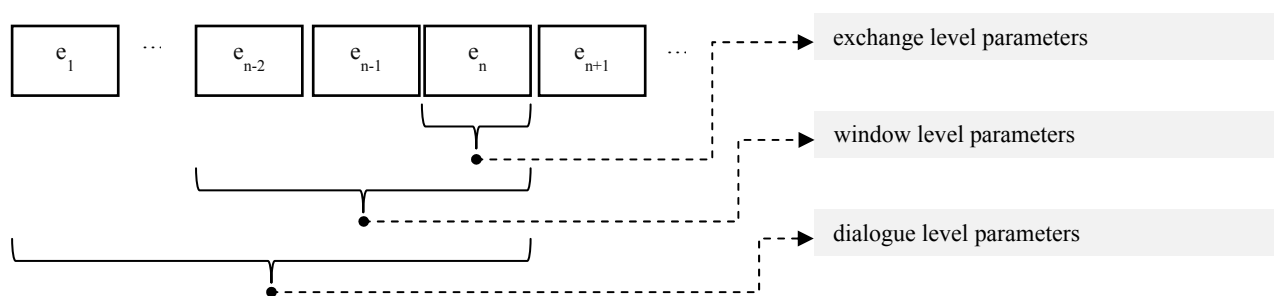


Fig. 1. The three different levels of interaction parameters

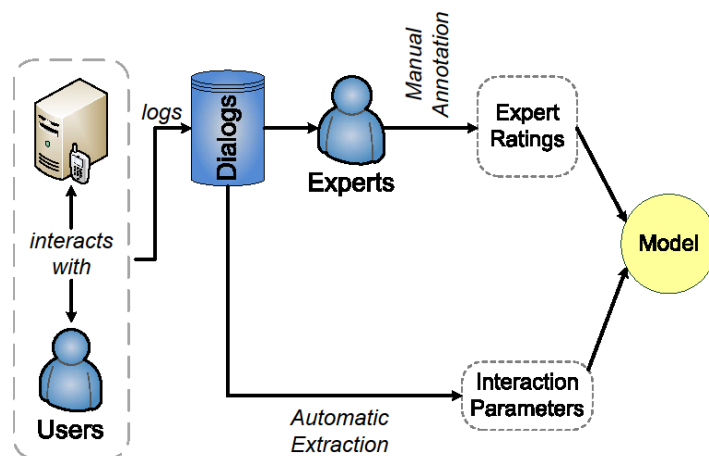


Fig. 2. Process for Interaction Quality estimation according to Schmitt et al. [2]

Parameters from the ASR module are, e.g., the confidence value, from the NLU module the semantic interpretation of the user input, and from the DM module information about the system action being a reprompts or an attempt to elicit common ground.

Moreover, these interaction parameters are designed on three levels: the exchange level, comprising information about the current system-user-exchange, the dialogue level, comprising information about the complete dialogue up to the current exchange, and the window level, comprising information about the n last exchanges. This is illustrated in Figure 1. A complete list of features can be found in [4].

Schmitt et al. [2] tackled the problem of automatic estimation of the IQ using a Support Vector Machine (SVM) [5] as statistical classification algorithm. Hence, they regard the problem as estimating five independent classes. The general process applied by Schmitt et al. for IQ classification is illustrated in fig. 2.

Dialogues between users and a dialogue system are recorded and logged. These logs are then analyzed by experts who apply quality ratings manually for each system user exchange on a scale from five (satisfied) to one (extremely unsatisfied). Furthermore, each exchange is annotated by three different raters. By following labeling guidelines, a certain degree of consistency between the raters is achieved still allowing enough freedom for individual ratings. For each exchange, a final rating is calculated by taking the median of the three expert ratings. The recordings, the logs of the dialogues and the correspond-

ing labels have been published under the title LEGO corpus [4].

Using the final quality rating as target variable for the classifier and using the previously presented interaction parameter as features, Schmitt et al. achieved an unweighted average recall (UAR) of 0.59. The UAR is defined as the arithmetic average of all class-wise recalls thus eliminating the effects of unbalanced data.

While it can be argued that user ratings should be preferred over expert ratings as only real users of the system can truly give an opinion about its quality, asking user directly holds some drawbacks as they can be considered to be collected more expensively. Furthermore, expert and user ratings are quite similar so that expert ratings can easily function as a good replacement for user ratings, cf. Ultes et al. [6].

Approaches on Interaction Quality Recognition. Schmitt et al. are the first to achieve acceptable results for quality estimation of SDSs on the exchange-level. Using their ground work, further approaches have been investigated analyzing more aspects of IQ recognition and pursuing an improvement of interaction quality.

Markovian Approaches. The approach by Schmitt et al. has a major drawback: there, all exchanges are considered to be independent of each other. However, there is a temporal link between the exchanges of one dialogue. To overcome this, Ultes et al. [7] replaced the SVM with two classification models inherently taking into account temporal dependencies.

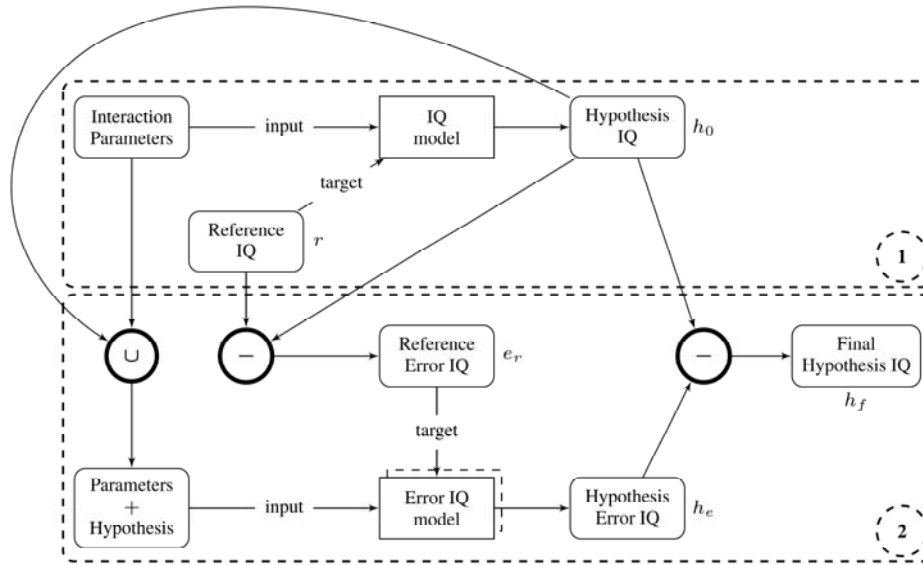


Fig. 3. Two-stage IQ classification using error correction

They applied a Hidden Markov Model (HMM) and a Conditioned Hidden Markov Model (CHMM) for estimating the target variable Interaction Quality based on interaction parameters. For applying a multi-class problem for the HMM, a model was instantiated consisting of five hidden states where each state was statically linked to one of the five quality classes. As the CHMM inherently provides class probabilities, no linking was necessary. Optimizing the state number resulted in a CHMM with nine hidden states. Both models used GMMs for modeling the observation probability. Unfortunately, both algorithms could not outperform the SVM baseline achieving only an UAR of 0.44 for the HMM and 0.39 for the CHMM.

A further approach by Ultes et al. exploiting the temporal character of the exchanges resulted in the Hybrid HMM approach. Here, they used static classifiers like an SVM or a Rule Learner trained in accordance to Schmitt et al. However, along with the classification results, also a confidence score for each quality class was computed. Adopting the HMM approach mentioned above, they used these confidence scores as observation probability achieving an improvement compared to plain static classification of up to 5% relative improvement.

Hierarchical approaches.

A total different approach to Interaction Quality Recognition has been presented by Ultes et al. rendering IQ recognition in two stages (figure 3). In stage one, regular IQ recondition is performed. The resulting hypotheses are then compared with the reference IQ values and an error is calculated. A second classification model is then used in stage two targeting the error. There, the hypothesis of stage one is used as additional feature. They achieved relative improvement of SVM classification of 4.1 % in UAR and 0.5 % for Rule Induction. Again, the absolute performance for Rule Induction was much better than for SVM classification. **Discussion.** It is notable that for all tested approaches, Rule Induction performs best. Superficially, this might indicate that the problem is not very hard and therefore simple rule defining is sufficient. If we

take a deeper look, the situation is different though. Rule Induction results in a big number of rules: In an example applying 6-fold cross-validation, 311 rules cover 5312 exchanges averaged per fold. This results in an average of 17 samples handled with one rule. Moreover, only 22 rules per fold cover more than or equal to 30 exchanges while 289 cover less than 30 exchanges. This shows that there are a high number of rules which cover outliers. One reason why this is not covered by the SVM might be that during SVM training, those are “pruned” for generalization reasons.

Analyzing the rules in order to get a better view on IQ itself does not reveal any new information. The only two conclusions which can be drawn are, first, that exchanges at the end of the dialogue (long dialogue duration) and exchanges with a lot of preceding reprompts have generally a low IQ value. Second, exchanges belonging to the beginning of a dialogue, which have little preceding reprompts, or which have a high ASR confidence have a good IQ value in general.

An important issue regarding the Interaction Quality paradigm lies in the data. Until now, only one dataset has been analyzed based on Let’s Go. Furthermore, it consists of many domain-specific parameters. While some of the more recent approaches removed parameters which strongly depend on the domain, the resulting set is still not completely domain independent. In order to be able to establish IQ as a general tool for evaluating and adapting Spoken Dialogue Systems, it is imperative to extend its analysis to other dialogue domains.

Conclusion. In this paper, we presented a review of the Interaction Quality metric for assessing Spoken Dialogue Systems on the exchange-level. While several approaches have already been tried, still some shortcomings exist. First of all, the selection of parameter is very domain-specific. While recent work removed most of those parameters, it still has to be shown that the IQ metric also works for other domains. Furthermore, while previous work regarded the problem as a classification task, the

suitability of applying regression methods for IQ estimation may be analyzed regarding it as estimating a continuous mathematical function. Finally, Conditioned Random Fields have shown to work well for sequence tagging. As this is related applying an IQ value to each exchange of a sequence of exchanges, those may also increase IQ recognition performance.

References

1. Walker M., Litman D., Kamm C. A., Abella A. PARADISE: a framework for evaluating spoken dialogue agents, in *Proceedings of the eighth conference on European chapter of the Association for Computational Linguistics*, Morristown, NJ, USA, 1997.
2. Schmitt A., Schatz B., Minker W. MODELING AND PREDICTING QUALITY IN SPOKEN HUMAN-COMPUTER INTERACTION, in *Proceedings of the SIGDIAL 2011 Conference*, Portland, Oregon, USA, 2011.
3. Ultes S., Schmitt A., Minker W. Towards Quality-Adaptive Spoken Dialogue Management, in *NAACL-HLT Workshop on Future directions and needs in the Spoken*

Dialog Community: Tools and Data (SDCTD 2012), Montréal, Canada, 2012.

4. Schmitt A., Ultes S., Minker W. A Parameterized and Annotated Corpus of the CMU Let's Go Bus Information System, in *International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*, 2012.

5. Vapnik V. N. The nature of statistical learning theory, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1995.

6. Ultes S., Schmitt A., Minker W. On Quality Ratings for Spoken Dialogue Systems – Experts vs. Users, in *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, to appear.

7. Ultes S., ElChabb R., Minker W. Application and Evaluation of a Conditioned Hidden Markov Model for Estimating Interaction Quality of Spoken Dialogue Systems, in *Proceedings of the 4th International Workshop on Spoken Language Dialog System (IWSDS)*, 2012.

© Ультес Ш., Минкер В., 2013

УДК 004.93

ON THE CONCEALMENT OF TRANSMISSION ERRORS FOR DISTRIBUTED SPEECH RECOGNITION SYSTEMS

D. Zaykovskiy

Ulm University

43, Albert-Einstein-Allee, Ulm, 89081, Germany. E-mail: dmitry@Zaykovskiy.de

The client-server speech recognition systems face the challenge to provide consistent performance over diverse channel conditions. It is therefore necessary to develop methods which could anticipate the effect of the transmission errors. In this paper we consider an error mitigation approach which does not modify the original data; instead it tries to reconstruct lost information at the receiver via interpolation of successfully transmitted features. Using the packet identification number the DSR server is able to decide unambiguously which packets were lost and which were closest packets received without error. With correctly received packets before and after the burst, error mitigation module can interpolate missing features.

Keywords: distributed speech recognition, transmission error mitigation, interpolation.

О СОГЛАСОВАНИИ ОШИБОК ПЕРЕДАЧИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Д. Зайковский

Университет города Ульма

Германия, 89081, Ульм, Аллея Альберта Эйнштейна 43. E-mail: dmitry@Zaykovskiy.de

В клиент-серверных системах распознавания речи стоит задача обеспечить последовательную работу в различных условиях канала передачи данных. Таким образом, необходимо разработать методы, которые позволят снизить эффект ошибок при передаче данных. В данной работе рассматривается подход для сглаживания ошибки, который не изменяет исходные данные, вместо этого он старается воссоздать потерянную информацию в приемнике с помощью интерполяции успешно переданных функций. Используя номер пакета идентификации сервера DSR, можно однозначно решить, какие пакеты были потеряны, и какие ближе к полу-

чению без ошибок. С помощью правильно принятых пакетов до и после работы модуля сглаживания можно интерполировать недостающие функции.

Ключевые слова: распределенное распознавание речи, сглаживание ошибки передачи, интерполяция.

The days are numbered where we used our mobile phones exclusively for telephone conversation. Today we have access to thousands of different applications and services for our mobile companions and their number is rapidly growing. However, the usability of such services is still hindered by the limited user interface of mobile devices. Speech based user interface could augment standard interface improving quality of the service. The main problem, however, is that reliable large vocabulary speech recognition cannot be done using limited resources of the mobile phones.

The most vividly discussed proposal to overcome this challenge is the principle of Distributed Speech Recognition (DSR). In this approach, the speech recognition process is separated into two parts: a front-end on the client-side and a back-end on the server-side. The front-end extracts characteristic features out of the speech signal, whereas the back-end, making use of the language and acoustic models performs the computationally costly recognition.

Fig. 1 shows system architecture for DSR. The client captures the speech signal using a microphone and extracts features out of the signal. The features are compressed in order to obtain low data rates and transmitted to the server. At the server back-end, the features are decompressed and subjected to the actual recognition process.

To ensure low latency and reduce transmission costs in the context of DSR the usage of a minimal message-oriented UDP protocol is advantageous for the feature transmission [1]. Since UDP does not use acknowledgment technique, it does not generate extra traffic for the retransmission of lost data. However, this means that some sort of error mitigation process has to be carried out on the server side to compensate for transmission losses. The approach which is considered in this paper aims to recover lost data using successfully received information. Using the packet identification number the DSR server is able to decide unambiguously which packets were lost and which were closest packets received without error. With correctly received packets before and after the burst, error mitigation module can interpolate missing features.

Fig. 1 shows system architecture for DSR. The client captures the speech signal using a microphone and extracts features out of the signal. The features are compressed in order to obtain low data rates and transmitted to the server. At the server back-end, the features are decompressed and subjected to the actual recognition process.

To ensure low latency and reduce transmission costs in the context of DSR the usage of a minimal message-oriented UDP protocol is advantageous for the feature transmission [1]. Since UDP does not use acknowledgment technique, it does not generate extra traffic for the retransmission of lost data. However, this means that some sort of error mitigation process has to be carried out on the server side to compensate for transmission losses. The approach which is considered in this paper aims to recover lost data using successfully received information. Using the packet identification number the DSR server is able to decide unambiguously which packets were lost and which were closest packets received without error. With correctly received packets before and after the burst, error mitigation module can interpolate missing features.

2. Classical interpolation methods. In the context of the DSR one can find several interpolation methods for loss recovery. Most prominent among those are the nearest neighbor repetition [2], the linear interpolation and the cubic Hermite polynomial interpolation [3]. In the following we will use notations introduced by James and Milner in the above mentioned work. For the loss burst of the length B with $\mathbf{X}_{\text{before}}$ and $\mathbf{X}_{\text{after}}$ being feature vectors correctly received immediately before and after erasure. The standard feature vector $\mathbf{X}_t$ contains 14 feature components characterizing speech frame t [2]. The missing feature vectors $\mathbf{X}_n$ for $1 \leq n \leq B$ will be determined as follows:

– **nearest neighbor repetition** – the missing frame is replaced by the nearest correctly received frame

$$X_n = \begin{cases} X_{\text{before}}, & n < B/2, \\ X_{\text{after}}, & n \geq B/2. \end{cases}$$

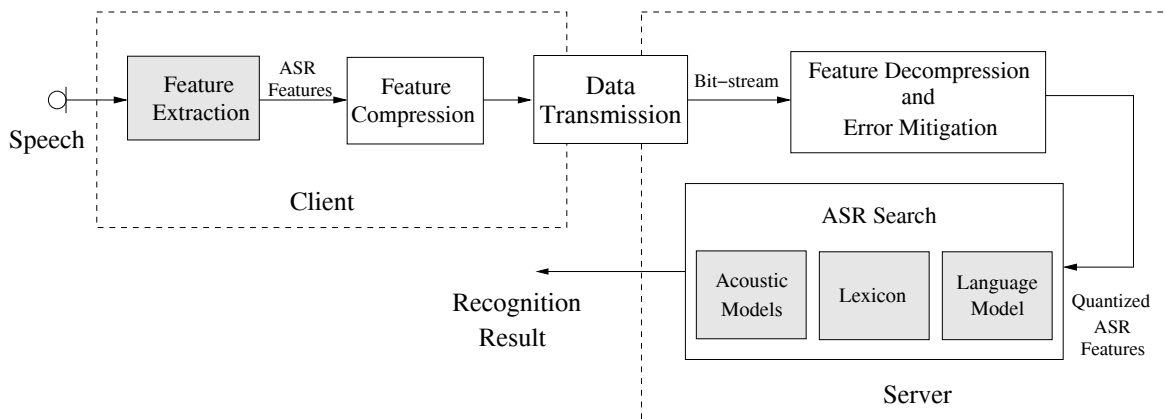


Fig. 1. Client-Server based ASR system – Distributed Speech Recognition

– **linear interpolation** – missing features are interpolated using linear function of time

$$X_n = X_{\text{before}} + \frac{n}{B+1}(X_{\text{after}} - X_{\text{before}}),$$

$$1 \leq n \leq B;$$

– **cubic Hermite polynomial** – is cubic polynomial interpolator with parameters implying continuous first derivatives of polynomial at the burst edges

$$X_n = X_{\text{before}}(1 - 3t^2 + 2t^3) +$$

$$+ X_{\text{after}}(3t^2 - 2t^3) +$$

$$+ X'_{\text{before}}(t - 2t^2 + t^3) + X'_{\text{after}}(t^3 - t^2),$$

where $t = n/(B+1)$ with $1 \leq n \leq B$ and X'_{before} and X'_{after} are approximations of derivatives which are iteratively calculated to preserve “nice looking” shape of the interpolated data (we have used Matlab implementation). At this point we have to note that due to the derivatives estima-

tion the cubic interpolator requires two consecutive feature vectors before and after the error burst.

Hybrid Correlation-Based Interpolator. In our experiments we were able to confirm the published results [3], claiming that the advance cubic interpolation to some extent outperforms the simple nearest neighbor repetition. However, a closer analysis of the statistical properties of the cepstral coefficients suggests that not all components can be equally well reconstructed using smooth interpolators, c. f. fig. 2.

In fact when analyzing the interframe component correlation, c. f. Figure 3, one can see that there exist a group of low correlated components and a group of high correlated coefficients. The weak correlated components have very low prediction power. Using sophisticated interpolation therefore does not make any sense for them. In turn, highly correlated coefficients result in a smooth time trajectory which can be well interpolated.

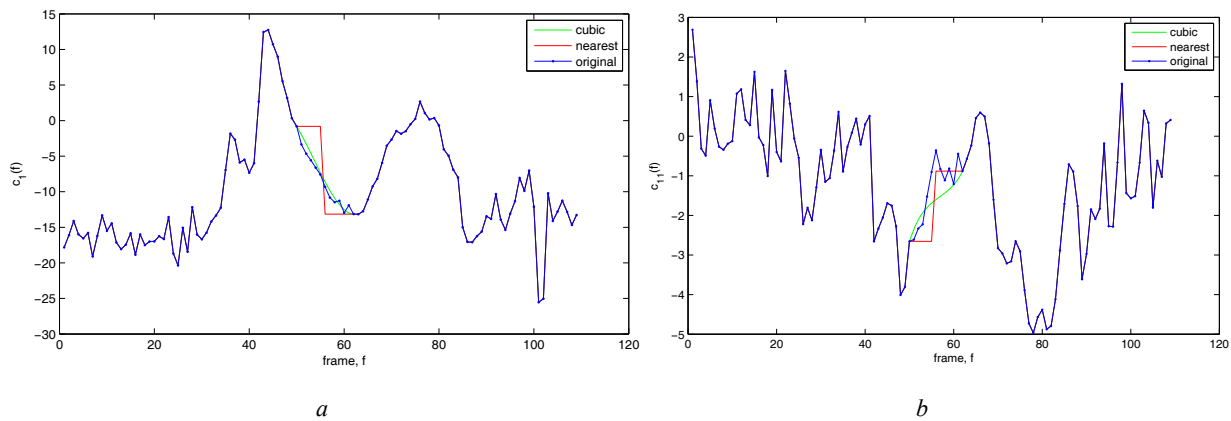


Fig. 2. Different interpolators used to recover missing feature components with different correlation level:
a – 1st feature vector component; b – 11th feature vector component

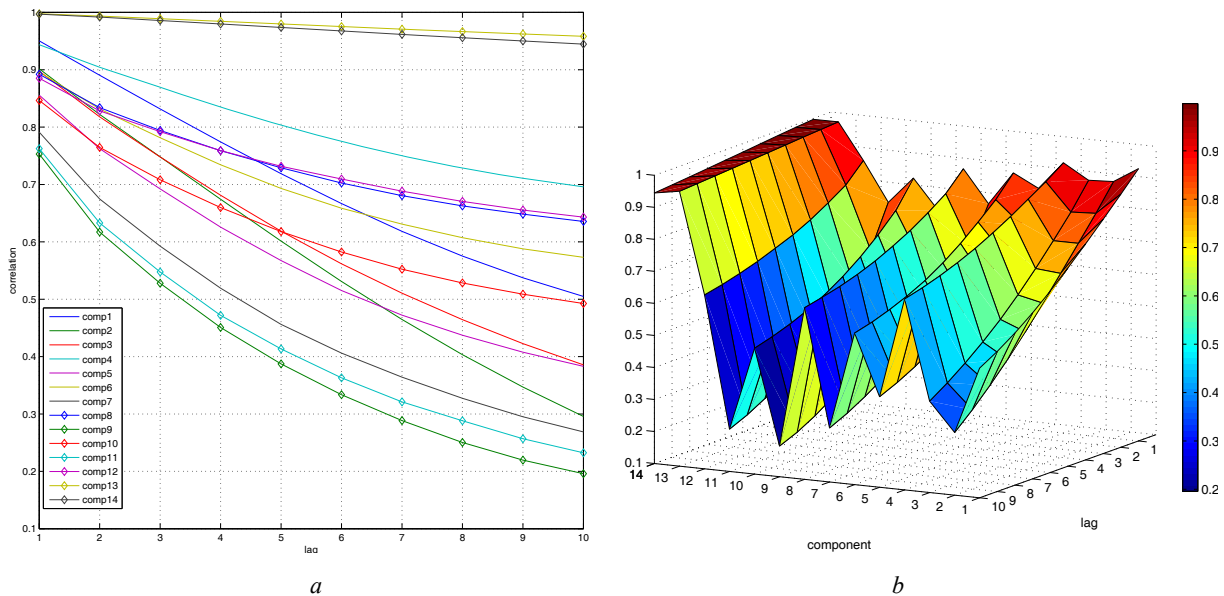
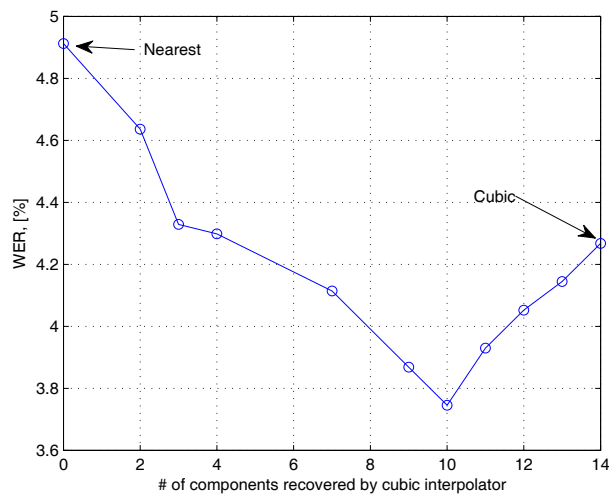
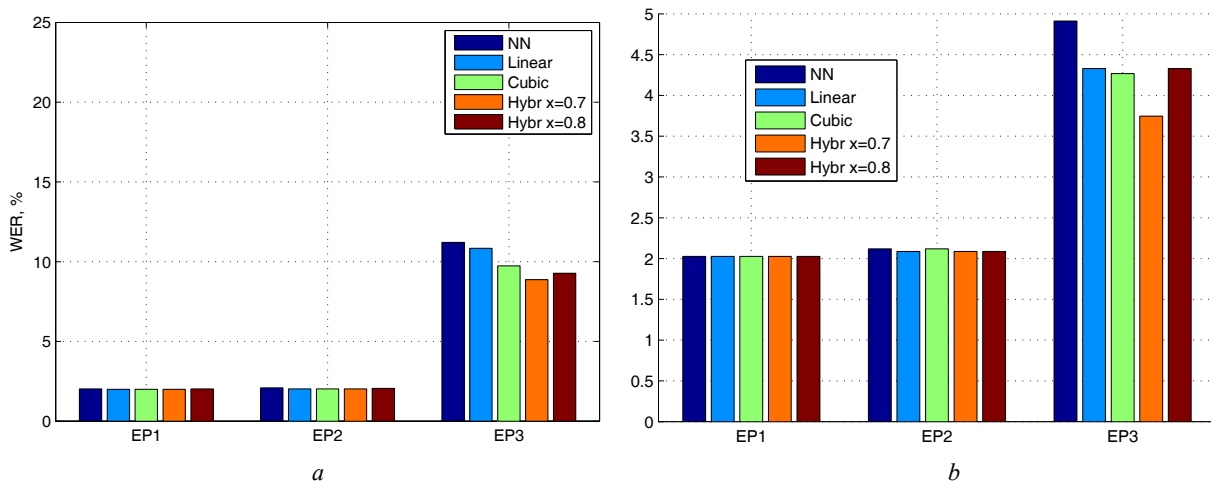


Fig. 3. Temporal correlation levels of different feature components:
a – 2D view; b – 3D view

Correlations and threshold x in component classification for hybrid interpolator

Component	Correlation > x														"cubic" component
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Intraframe correlation with lag = 3	0,8	0,75	0,75	0,87	0,69	0,78	0,59	0,79	0,53	0,71	0,55	0,79	0,99	0,99	
$x = 0.5$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	14
$x = 0.6$	x	x	x	x	x	x	—	x	—	x	—	x	x	x	11
$x = 0.7$	x	x	x	x	—	x	—	x	—	x	—	x	x	x	10
$x = 0.8$	x	—	—	x	—	—	—	—	—	—	—	—	x	x	4
$x = 0.9$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	x	x	2
$x = 1$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0


Fig. 4. Dependence of the recognition accuracy on the threshold x

Fig. 5. Performance of different interpolators in conjunction with different interleaving modes:
 a – no interleaving; b – packet interleaving with depth $d = 5$

This observation served as a motivation for our hybrid interpolator – it is a combination of the nearest neighbor (NN) approach and the cubic estimator:

- use cubic for highly correlated components – Class I;
- use NN for low correlated component – Class II.

In order to separate the 14 feature components into these two categories a certain threshold has to be found. For that we analyzed 1001 record on the test set 1 from the Aurora-2 database. We have considered interframe correlation with lag three for all 14 components. Table shows the obtained correlations and the classification of components into Class I and Class II for different threshold levels.

It should be noted that when threshold x is set at very low level ($x = 0,5$) all components are assigned to the Class I and hybrid interpolator converges to a pure cubic approach. For $x = 1$ it becomes a pure NN interpolator. To determine the optimal threshold level we have performed a number recognition experiments with different threshold levels using real life error pattern EP3.

As we can see on figure 4 the dependence of the recognition accuracy on the threshold shows a clear optimum. Furthermore the optimal WER for the hybrid strategy outperforms individual WERs of both NN and cubic interpolations schemes. The optimal threshold for this test was $x = 0,7$. It implies cubic interpolation for 10 components and nearest neighbor estimations for the remaining 4.

Experimental Results and Conclusion. In order to evaluate the performance of different interpolation approaches we have conducted a number of recognition experiments on the test set A from the AURORA-2 task [4]. Three different error patterns (EP1, EP2 and EP3) corresponding to good, medium and poor transmission channel quality were used. figure 5, *a* shows obtained word error rates. figure 5, *b* compares performance of different interpolation approaches when DSR setup is augmented

by the interleaving of input data [3]. From the diagram it becomes clear that basically all methods perform at the same level over good (EP1) and medium (EP2) quality channels. At the same time under more demanding transmission channel conditions the suggested hybrid approach offers some additional gain in quality of service.

In this paper we suggested new hybrid approach to the interpolation of lost features combining nearest neighbor repetition and cubic interpolation. The experiments with different system settings and channel conditions have shown that such an interpolator is more advantageous compared to the standard ones. Furthermore it was shown that it can be easily combined with packet interleaving technique as a joint measure for the concealment of transmission errors.

References

1. Zaykovskiy D., Schmitt A. and Lutz M. (2007). New Use of Mobile Phones: Towards Multimodal Information Access Systems. 3rd IET International Conference on Intelligent Environments, Ulm, Germany.
2. Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ) (2000). Distributed Speech Recognition; Front-end Feature Extraction Algorithm; Compression Algorithm. ETSI Standard ES 201 108.
3. James A. B. and Milner B. P. (2004). Interleaving and estimation of lost vectors for robust speech recognition in burst-like packet loss. In Proc. EUSIPCO, p. 1947–1950.
4. Hirsch H.-G. and Pearce D. (2000). The AURORA experimental framework for the performance evaluation of speech recognition systems under noisy conditions. In Proc. ISCA ITRW ASR2000, p. 181–188, Paris, France.

РАЗДЕЛ
2

АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.396.67

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Гончарук¹, М. В. Лукьяненко², В. А. Раевский¹

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52
E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Ставится задача оценить величину возмущающего момента системы наведения антенн (СНА), действующего на космический аппарат (КА), при проведении экспериментальной отработки. Для этого используется стенд инерционный (СИ), способный создавать реальные инерционные нагрузки. Оцениваются величины возмущающих моментов, создаваемых при движении антенны с постоянной скоростью, а также при наборе и снижении скорости при отработке приближения к целеуказанию. Дается оценка полученному значению возмущающего момента, приведенного к посадочному месту блока механического (БМ) СНА. Оценивается величина возможного углового отклонения КА при воздействии на него возмущающего момента, создаваемого при движении антенны. С учетом требований по точности ориентации антенн и КА «Луч-5» полученные результаты считаются приемлемыми и могут использоваться для оценки влияния на точность ориентации аппарата и ориентацию в пространстве антенны при наведении на наземные пункты, международную космическую станцию, КА, находящиеся на низкой и круговой орбитах.

Ключевые слова: система наведения антенны, стенд инерционный, возмущающий момент, инерционные нагрузки.

EVALUATION OF THE ANTENNA POINTING SYSTEM DISTURBING MOMENT IN THE EXPERIMENTAL PROCESS

A. V. Goncharuk¹, M. V. Lukyanenko², V. A. Raevsky¹

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

This article provides the task of estimation of the antenna pointing system disturbing moment in the experimental process. For this purpose the installation for the inertia simulation is used. The value of disturbing moments created by the movement of the antenna at a constant rate, as well as the recruitment and reducing the rate at moving closer to the target is estimated. The value of the resulting disturbing moment at the place of the docking unit of the mechanical guidance system antennas is estimated. The value of the possible angular deviation of the spacecraft when exposed the disturbing moment generated by moving the antenna is estimated. According to the requirements on the accuracy of the orientation of the antennas and spacecraft "Luch-5," the results are considered acceptable and can be used to assess the impact on the accuracy of the orientation of the spacecraft and orientation in the space when you point the antenna to the ground station, international space station, space vehicles, which are on the low and circular orbits.

Keywords: antenna pointing system, disturbing moments, installation for the inertia simulation.

При проектировании СНА была поставлена задача оценить величину возмущающего момента системы, действующего на КА, чтобы убедиться, что при выполнении основной функции СНА не влияет на ориентацию и стабилизацию КА [1].

Оценить возможные возмущающие моменты необходимо было в процессе наземной экспериментальной отработки СНА. Для этого был разработан СИ, предназначенный для создания реальных инерционных нагрузок, проверки возмущающих моментов при работе электромеханических устройств типа БМ СНА.

СИ имеет следующий состав:

- подставка под объект контроля, включающая в себя основание и плиту установочную;
- инерционный имитатор, включающий в себя штангу, наборы грузов, элемент передачи момента на выходной вал, переходник и кронштейн для установки датчика угловой скорости;
- система обезвешивания;
- инерционно-жесткостный имитатор штанги КА для БМ СНА;
- датчик угловой скорости (ДУС).

Функциональная схема СИ представлена на рис. 1.

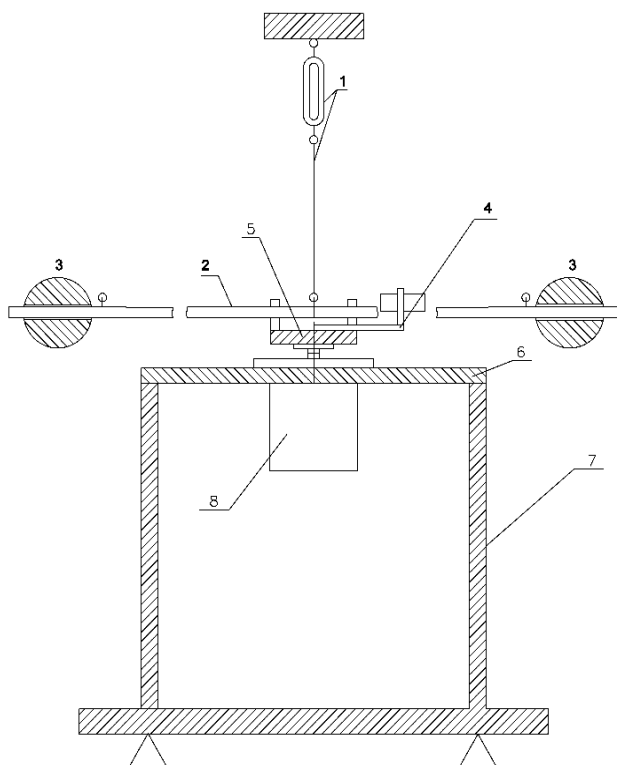


Рис. 1. Функциональная схема инерционного стенда: 1 – система обезвешивания; 2 – штанга; 3 – груз; 4 – датчик угловой скорости с кронштейном для установки; 5 – элемент для передачи момента на выходной вал; 6 – плата установочная; 7 – основание; 8 – объект контроля

Стенд построен для однокоординатного измерения возмущающих моментов при вращении механизма. На СИ с помощью ДУС, установленного на выходном валу БМ СНА:

- измерялась величина угловой скорости выходного вала БМ СНА с частотой опроса 100 Гц;
- определялась величина углового ускорения выходного вала БМ СНА путем дифференцирования угловой скорости;
- определялась величина возмущающего момента по формуле

$$M_B = J_H \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где J_H – момент инерции нагрузки, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая скорость вращения выходного вала БМ СНА по показаниям внешнего измерителя угловой скорости, $\text{рад}/\text{с}$.

При проведении данной работы инерционным имитатором создавался момент инерции, равный $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Такая величина момента инерции обусловлена результатами разработки антенного рефлектора. Измерение возмущающего момента при движении БМ СНА проводилась в два этапа. На первом этапе были получены результаты по возмущающим моментам, создаваемым при движении антенны с постоянной скоростью. Имитировался режим движения со скоростью в диапазоне скоростей слежения за подвижными объектами. На втором этапе работы оценивалась величина возмущающего момента при наборе и снижении скорости при отработке приближения к целеуказанию (подходе к точке).

Для построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) возмущающих моментов использовалась программная среда Matlab, функция `fft` [2, с. 138], реализующая алгоритм быстрого преобразования Фурье.

При испытаниях с моментом инерции, равным $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, с постоянной скоростью в заданном диапазоне от 0 до $1,2'/\text{с}$ максимальная амплитуда периодической составляющей возмущающего момента составила:

- в диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц – $1,023 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- в диапазоне частот более 1 Гц – $3,025 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Результаты измерений возмущающих моментов при работе канала СНА с постоянной скоростью с моментом инерции, равным $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, приведены в табл. 1.

Графики АЧХ возмущающих моментов приведены на рис. 2, 3.

При испытаниях с моментом инерции, равным $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, при разгоне до максимальной скорости ($7'/\text{с}$) максимальная амплитуда периодической составляющей возмущающего момента составила:

- в диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц – $1,445 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- в диапазоне частот более 1 Гц – $2,482 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Результаты измерений возмущающих моментов, создаваемых каналом СНА при разгоне до максимальной скорости ($7'/\text{с}$) с моментом инерции, равным $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, приведены в табл. 2.

Графики АЧХ возмущающих моментов приведены на рис. 4, 5.

Таблица 1

Привод	Постоянная скорость, $\text{'}\text{с}$	Возмущающий момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$		Привод	Постоянная скорость, $\text{'}\text{с}$	Возмущающий момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$	
		В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц			В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц
В	0,1	$0,0455 \cdot 10^{-3}$	$1,242 \cdot 10^{-2}$	Н	0,1	$0,0513 \cdot 10^{-3}$	$1,902 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$0,1283 \cdot 10^{-3}$	$1,713 \cdot 10^{-2}$		0,3	$0,1436 \cdot 10^{-3}$	$2,734 \cdot 10^{-2}$
	1	$0,3347 \cdot 10^{-3}$	$0,442 \cdot 10^{-2}$		1	$0,4254 \cdot 10^{-3}$	$2,746 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Привод	Приращение скорости при разгоне, %	Возмущающий момент, Н·м		Привод	Приращение скорости при разгоне, %	Возмущающий момент, Н·м	
		В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц			В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц
В	0,1	$0,8998 \cdot 10^{-3}$	$1,682 \cdot 10^{-2}$	Н	0,1	$0,7277 \cdot 10^{-3}$	$1,331 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$1,006 \cdot 10^{-3}$	$1,717 \cdot 10^{-2}$		0,3	$0,8711 \cdot 10^{-3}$	$1,206 \cdot 10^{-2}$
	0,5	$1,289 \cdot 10^{-3}$	$1,307 \cdot 10^{-2}$		0,5	$1,213 \cdot 10^{-3}$	$0,454 \cdot 10^{-2}$
	0,1	$0,768 \cdot 10^{-3}$	$0,475 \cdot 10^{-2}$		0,1	$0,6984 \cdot 10^{-3}$	$1,855 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$1,121 \cdot 10^{-3}$	$1,323 \cdot 10^{-2}$		0,3	$1,049 \cdot 10^{-3}$	$1,375 \cdot 10^{-2}$
	0,5	$1,445 \cdot 10^{-3}$	$2,482 \cdot 10^{-2}$		0,5	$1,238 \cdot 10^{-3}$	$1,201 \cdot 10^{-2}$

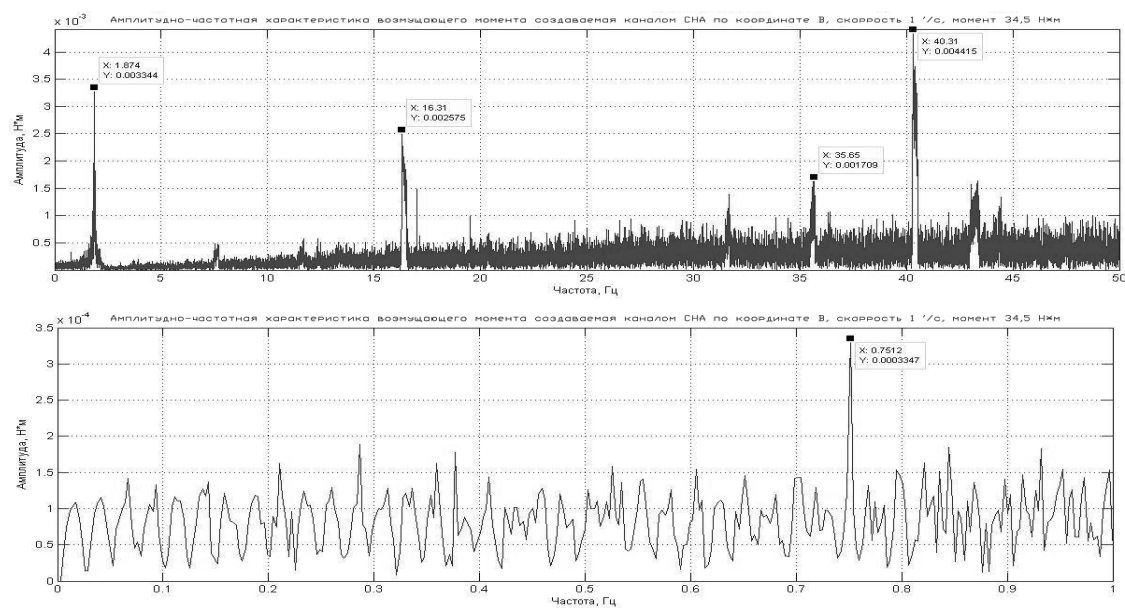


Рис. 2. График АЧХ привода В при работе с постоянной скоростью 1 %/с

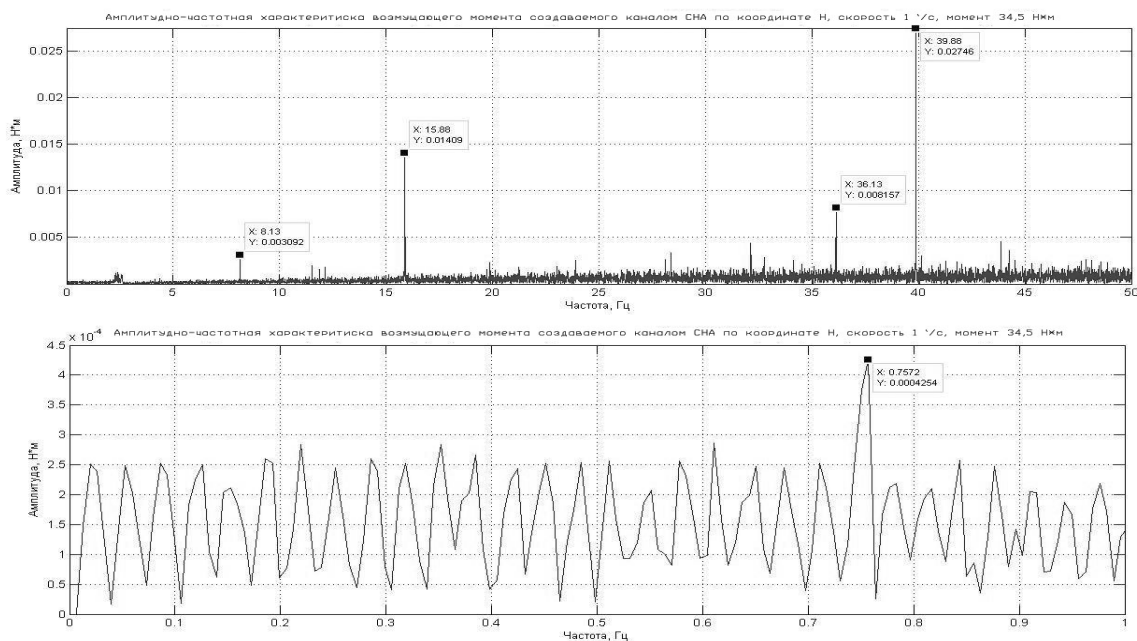


Рис. 3. График АЧХ привода Н при работе с постоянной скоростью 1 %/с

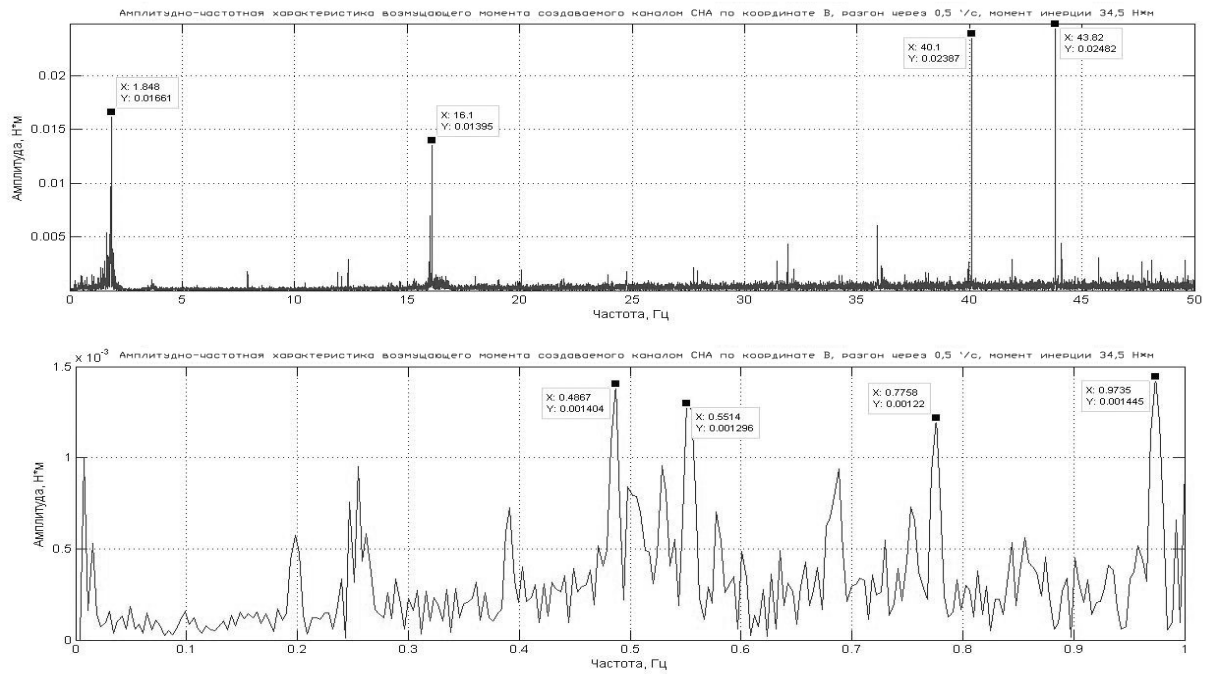


Рис. 4. График АЧХ БМ СНА привод В2 (разгон через 0,5 °/с)

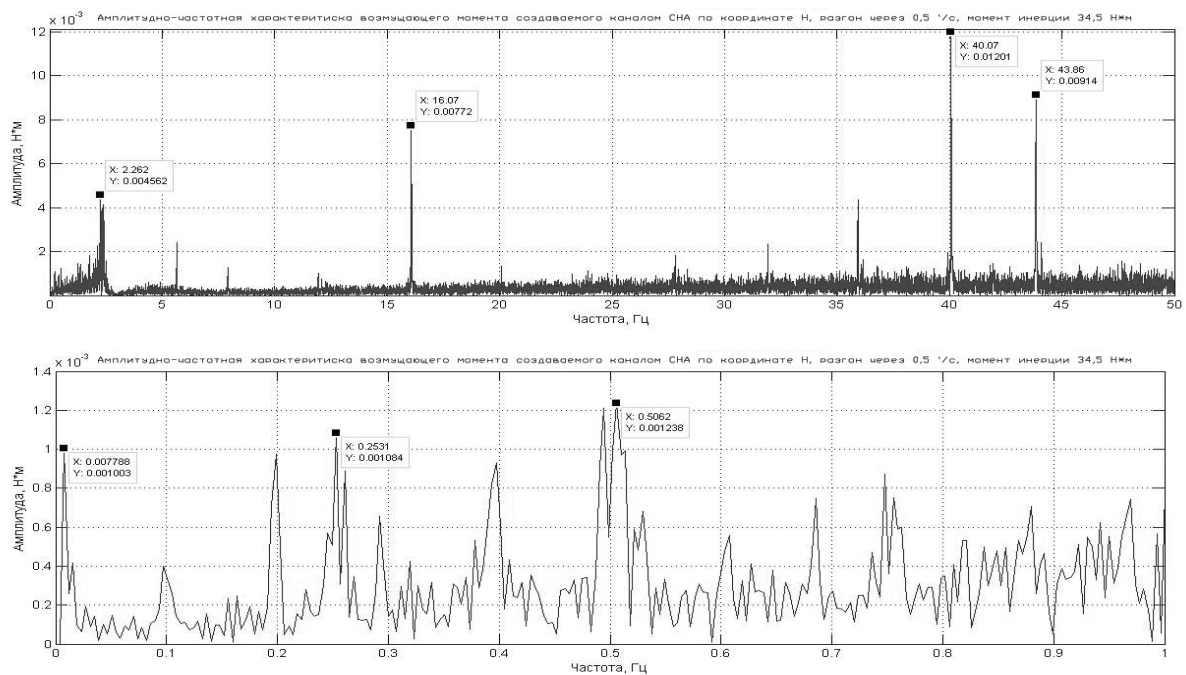


Рис. 5. График АЧХ БМ СНА, привод Н2 (разгон через 0,5 °/с)

Максимальная амплитуда периодической составляющей для собственных колебаний ДУС приходится на частоты 15,87 и 39,87 Гц.

Максимальная амплитуда периодической составляющей для собственных колебаний штанги СИ приходится на частоты 2,685 Гц.

Результаты измерений показали:

– СНА при работе с моментом инерции нагрузки $34,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, рассчитанным для модуля полезной нагрузки КА «Луч-5А», при движении приводов со скоростями от 0 до 1,2°/с в диапазоне частот от 0,1

до 1 Гц не создает возмущающих моментов, превышающих установленные требования;

– СНА при работе с моментом инерции нагрузки $34,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, рассчитанным для модуля полезной нагрузки КА «Луч-5А», при движении с выходом на максимальную скорость и торможением до нулевой скорости создает возмущающие моменты, превышающие установленные требования на 44 % для периодической составляющей в диапазоне от 0,1 до 1 Гц и на 48 % для периодической составляющей во всем диапазоне частот от 1 Гц.

Наличие в частотном спектре в диапазоне частот от 1 Гц периодической составляющей возмущающего момента с амплитудой, превышающей заданные пределы, обусловлено наличием в данной области частот периодических составляющих собственных колебаний штанги инерционного макета и ДУС.

Учитывая, что режим работы СНА с небольшим превышением уровней возмущающих моментов кратковременный (при движении из нулевого положения в крайнюю точку зоны перенацеливания не более 2,5 минут), а в режимах движения с постоянной скоростью уровни возмущающих моментов не превышают заданных требований, то полученные результаты можно считать приемлемыми для КА серии «Луч-5».

Полученные результаты характеризуют величину возмущающих моментов, приведенных к посадочному месту БМ СНА.

Момент, приложенный к штанге, на которой размещен БМ с антенной, определяется по формуле (1). Тогда относительно величины этого момента, приложенного к концу штанги, можно оценить величину углового отклонения КА. Величину углового смещения определим через ускорение, придаваемое КА возмущающим моментом:

$$\ddot{\theta}_{КА} = \frac{M_B}{J_{КА}}, \quad (2)$$

где $J_{КА}$ – момент инерции КА, кг·м²; $\ddot{\theta}_{КА}$ – угловое ускорение КА, °/с².

Не учитывая динамику движения космического аппарата и допуская, что он является твердым телом с моментом инерции, угловое смещение от действия возмущающего момента в одной плоскости можно определить как

$$\theta_{КА} = \frac{\ddot{\theta}_{КА} \cdot T_{уп}^2}{2}, \quad (3)$$

где $\theta_{КА}$ – угловое смещение КА, °; $T_{уп}$ – время работы программного обеспечения, с.

С учетом выражения (2) выражение (3) примет вид:

$$\theta_{КА} = \frac{M_B \cdot T_{уп}^2}{2 \cdot J_{КА}}, \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) следующие значения: возмущающий момент $2,482 \cdot 10^{-2}$ Нм, момент инерции

КА 4800 кг·м², время работы программного обеспечения 4 с, получаем величину $\theta_{КА} = 0,153'$.

Полученная величина отклонения КА при действии возмущающего момента не превышает допустимого значения для отклонения ориентации при движении антенн КА серии «Луч».

В результате проведенной работы были получены данные о величине возмущающих моментов, которые могут создаваться при работе системы наведения антенн, как в режиме слежения, так и в режиме перевода в точку. С учетом требований по точности ориентации антенн и КА «Луч-5» в целом, полученные результаты можно считать приемлемыми. Данные результаты могут быть использованы для оценки динамических процессов на КА в целом и оценки влияния на его точность ориентации и ориентацию в пространстве антенны при наведении на наземные пункты, международную космическую станцию, КА, находящиеся на низкой и круговой орбитах. В случае применения систем наведения антенн при лазерном наведении, что влечет за собой более точную ориентацию антенн и КА в единицы угловых секунд, данная работа будет требовать дополнительного изучения характера возникновения возмущающих моментов для уменьшения их величины и возможности их компенсации.

Библиографические ссылки

1. Раевский В. А., Гончарук А. В. ФЕИТ. 371111.039. 2005.
2. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб. : Питер, 2002. 608 с.

References

1. Raevsky V. A., Goncharuk A. V. FEIT. 371111.039, 2005.
2. Dyakonov V. P., Abramenkova I. V. MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy (MATLAB. Signal and image processing). A special handbook. St. Petersburg, Peter, 2002, 608 p.

© Гончарук А. В., Лукьяненко М. В.,
Раевский В. А., 2013

УДК 621.37.037

БОРТОВАЯ ОПТИКО-РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА

М. В. Ермолаев¹, Д. И. Марарескул¹, Е. В. Ислентьев¹, А. М. Алешечкин²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: ermakc@iss-reshetnev.ru

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28

Рассмотрена проблема защиты геостационарных космических аппаратов (КА) от космического мусора, в том числе от геостационарных спутников, не увенчанных на орбиту захоронения. Для обеспечения безопасности КА необходима совместная работа нескольких бортовых систем. Бортовая оптико-радиолокационная система предназначена для обнаружения космических объектов и определения координат. Рассмотрены преимущества комплексирования оптической и радиолокационной аппаратуры, принципы работы и варианты построения бортовой оптико-радиолокационной системы геостационарного космического аппарата. Проведен сравнительный анализ вариантов построения, приведены структурные схемы. Рассмотрены точностные характеристики, проведена оценка потребляемой мощности и массы системы.

Ключевые слова: космический мусор, бортовые системы космических аппаратов, бортовые радиолокационные системы.

AN ONBOARD OPTICAL AND RADAR SYSTEM

M. V. Ermolaev¹, D. I. Marareskul¹, E. V. Islentev¹, A. M. Aleshechkin²

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: ermakc@iss-reshetnev.ru

²Siberian Federal University
28, Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

The article considers the problem of GEO satellites defense against space debris like the satellites which have not been relocated to the storage orbit. A joint work of several satellite systems is necessary to provide the satellite safety in the space. The onboard optical and radar system is intended for the detection of the space objects and coordinates measurement. The authors consider the advantages of optical and radar equipment combining, operational principle and versions of the structure. The block diagrams for versions of the structure are considered. The authors consider the accuracy characteristics and estimate a system mass and power consumption.

Keywords: space debris, satellite onboard systems, onboard radar systems.

Спутниковая связь и вещание с геостационарной орбиты (ГСО) в настоящее время является коммерчески выгодным, динамично развивающимся видом космической деятельности. Однако с увеличением количества космических аппаратов (КА), в том числе размещенных на геостационарной орбите, все острее встает проблема засорения околоземного космического пространства.

Космическим мусором называют вышедшие из строя космические аппараты, отработавшие ракетные и прочие устройства, их обломки и т. п., остающиеся на околоземных орбитах. В последнее время космический мусор стал представлять все большую опасность для вновь запускаемых космических аппаратов, но приемлемые способы борьбы с ним пока не разработаны [1].

Космические объекты искусственного происхождения сосредоточены преимущественно в трех областях: на орбитах до 5 000 км, около 20 000 км и около 35 000 км (рис. 1) [2]. Таким образом, геостационар-

ная орбита с высотой 35 785 км является одним из поясов с повышенной концентрацией космического мусора. Следует отметить, что практически все объекты космического мусора на ГСО остаются в районе этой орбиты навсегда, накапливаясь со временем численно и увеличивая вероятность столкновения с КА [3]. Так, в 2012 г. с геостационарной орбиты на орбиту захоронения не было уведено четыре вышедших из строя космических аппарата, а в общей сложности в области геостационарной орбиты в настоящее время находится 178 неуправляемых спутников [4]. Скорость этих аппаратов относительно КА на ГСО в связи с эволюцией орбиты может достигать 300 м/с, поэтому неуправляемые КА представляют серьезную угрозу для спутников, функционирующих на орбите по целевому назначению.

Для обеспечения безопасности геостационарных КА необходимо производить непрерывный контроль окружающего пространства спутника и оперативно принимать решения о коррекции орбиты аппарата

в случае возникновения угрозы столкновения с неуправляемыми космическими объектами. Эти функции в полной мере может осуществлять система, расположенная на борту космического аппарата, поскольку наземные средства не обладают достаточной точностью и оперативностью обнаружения и определения орбиты объектов, угрожающих безопасности геостационарного спутника.

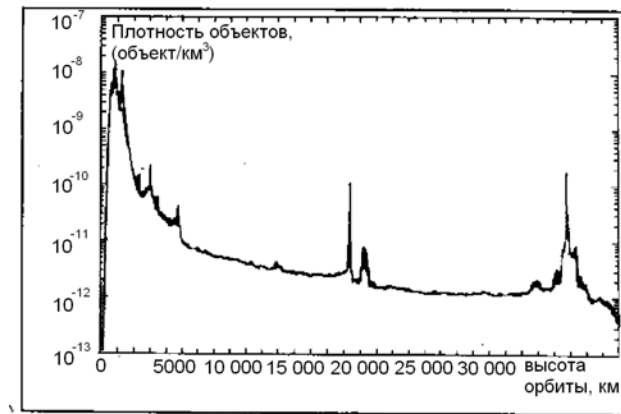


Рис. 1. Распределение космического мусора в околоземном пространстве

В работе [5] были рассмотрены возможные варианты построения системы обеспечения безопасного движения КА. Анализ показал, что в контуре обеспечения безопасности КА должны быть задействованы несколько систем спутника, большинство из которых в настоящее время уже разработаны и успешно эксплуатируются на существующих КА. Однако до настоящего времени в отечественной практике в составе КА не применялась бортовая система обнаружения и измерения координат космических объектов. Авторы работы [5] рассматривают следующие методы обнаружения объекта и слежения:

- 1) пассивное оптическое обнаружение;
- 2) активная радиолокация;
- 3) активная лазерная локация.

По результатам анализа в работе [5] делается вывод, что целесообразным является комплексирование различных принципов обнаружения и слежения при разработке системы.

Результаты измерений бортовой системы обнаружения и измерения координат должны передаваться в бортовое программное обеспечение, которое будет осуществлять расчет вектора кинематических параметров объекта космического мусора, прогнозирование его траектории и планирование проведения коррекций орбиты КА в случае возникновения опасных сближений КА и объекта.

В представленной статье рассматривается один из вариантов построения системы обнаружения и измерения координат – бортовая оптико-радиолокационная система (БОРЛС).

Бортовая оптико-радиолокационная система предназначена для решения следующих задач:

- обнаружение объектов, находящихся в непо-

средственной близости от КА и угрожающих его безопасности;

- определение координат объектов и параметров их движения;
- сопровождение указанных объектов до выхода их из зоны действия системы;
- передача измеренных параметров движения объектов бортовому программному обеспечению для дальнейшей обработки информации и принятия решения об осуществлении маневра КА.

БОРЛС должна функционировать в соответствии со следующими основными принципами:

1. На солнечном участке орбиты при отсутствии засветки оптической аппаратуры обнаружение, сопровождение и определение угловых координат объекта производится только оптическими средствами. Угловые координаты определяются с малыми погрешностями, обусловленными разрешающей способностью оптических средств. Радиолокационные средства используются только для определения дальности до объекта, при этом измерения производятся с большой периодичностью.

2. При наличии засветки и на теневом участке орбиты обнаружение, сопровождение и определение угловых координат и дальности до объекта производится радиолокационными средствами. Угловые координаты определяются с увеличенной погрешностью, обусловленной шириной диаграммы направленности. Точное определение угловых координат объекта производится при появлении возможности использования оптических средств.

Совмещение оптической и радиолокационной аппаратуры в одной системе имеет следующие преимущества:

1. Возможность выполнения функций системы при невозможности использования оптической либо радиолокационной аппаратуры.
2. Увеличение срока эксплуатации радиолокационной аппаратуры за счет увеличения периода проведения измерений.
3. Возможность оптимизации массы и габаритов антенной системы за счет увеличения ширины главного лепестка диаграммы направленности и снижения требований к точности определения угловых координат радиолокационными средствами.

Для решения поставленных задач БОРЛС должна включать в себя следующие структурные элементы:

- 1) оптико-радиолокационную аппаратуру (ОРЛА);
- 2) бортовое программное обеспечение (БПО).

ОРЛА должна обеспечивать полный просмотр пространства вокруг КА, обнаружение и измерение координат объектов, сопровождение объектов. Измерение координат объекта оптико-радиолокационной аппаратурой должно производиться в собственной приборной системе координат. Пересчет измеренных значений в орбитальную систему координат должен производиться в БПО с использованием информации от других систем.

БПО должно обеспечивать управление ОРЛА согласно заданным алгоритмам работы и расчет вектора кинематических параметров объекта по измеренным значениям координат.

Возможно несколько вариантов функционирования БОРЛС:

- 1) с последовательной работой блоков ОРЛА;
- 2) с параллельной работой блоков ОРЛА.

При функционировании по схеме с последовательной работой блоков поиск, обработка видеоизображений, формирование и прием радиолокационных сигналов производится последовательно для каждого средства обнаружения и слежения.

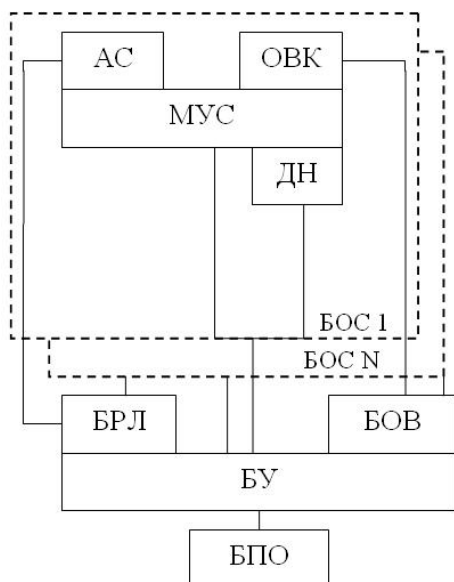


Рис. 2. Структурная схема БОРЛС при последовательном функционировании блоков

При *последовательном функционировании* ОРЛА должна включать в себя следующие структурные блоки:

1. Блоки обнаружения и слежения (БОС).
2. Блок формирования и обработки радиолокационных сигналов (БРЛ).
3. Блок обработки видеоизображения (БОВ).
4. Блок управления (БУ).
5. Линии связи (ЛС).

Блоки обнаружения и слежения устанавливаются в различных частях КА для обеспечения осмотра всего пространства вокруг КА и должны выполнять следующие функции: формирование видеоизображения оптическими средствами; передача и прием радиолокационных сигналов; механическое сканирование пространства – изменение направления оптической оси и зоны видимости оптических средств; изменение направления главного лепестка диаграммы направленности приемо-передающей радиолокационной антенны; формирование информации о направлении оптической оси и главного лепестка диаграммы направленности.

Каждый блок обнаружения и слежения должен включать в себя следующие составные части:

- 1) обзорная видеокамера (ОВК) с оптической системой)
- 2) антенная система (АС))

При параллельном функционировании возможно проводить контроль пространства, окружающего КА, всеми средствами обнаружения и слежения одновременно, что сокращает время поиска и обнаружения объекта.

Структурная схема БОРЛС с последовательной работой блоков ОРЛА представлена на рис. 2.

Структурная схема БОРЛС с параллельной работой блоков ОРЛА представлена на рис. 3.

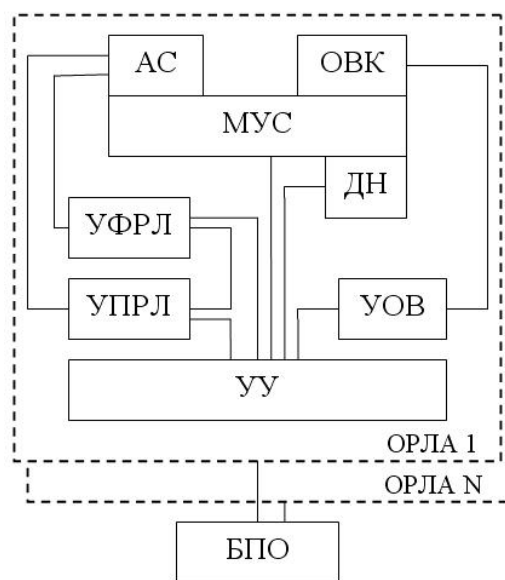


Рис. 3. Структурная схема БОРЛС при параллельном функционировании блоков

3) механическое устройство сканирования (МУС))

4) датчики направления (ДН).

Блок формирования и обработки радиолокационных сигналов должен производить формирование зондирующих радиосигналов, обработку радиосигналов, принятых АС, принятие решения о пеленгации объекта, определение дальности до объекта.

Блок обработки видеоизображения предназначен для выполнения следующих функций: обработка видеоизображения, поступающего от ОВК; принятие решения о наличии объекта в зоне видимости оптических средств; определение координат объекта.

Блок управления предназначен для реализации алгоритмов поиска и слежения за объектом, первичной обработки результатов измерений, определения вектора состояния объекта в приборной системе координат и взаимодействия с БПО.

Линии связи предназначены для передачи радиосигналов между БОС и АС и обмена информацией между структурными блоками ОРЛА.

При построении по схеме с *параллельной работой* блоков на КА устанавливается несколько комплектов ОРЛА, каждый из которых выполняет следующие функции:

1. Формирование, передача, прием и обработка радиолокационных сигналов.

2. Обработка данных, поступающих от оптических средств.

3. Первичная обработка результатов оптических и радиолокационных измерений.

4. Реализация алгоритмов поиска и слежения за объектом, обработка результатов измерений и взаимодействие с БПО.

Каждый комплект ОРЛА при параллельном функционировании должен включать в себя следующие составные части:

1. Обзорная видеокамера (ОВК) с оптической системой.

2. Устройство обработки видеоизображения (УОВ).

3. Устройство формирования радиолокационных сигналов (УФРЛ).

4. Устройство приема и обработки радиолокационных сигналов (УПРЛ).

5. Антенная система (АС).

6. Механическое устройство сканирования (МУС) с датчиками направления (ДН).

7. Устройство управления (УУ).

Последовательная работа блоков БОРЛС позволяет сократить массу, габариты и энергопотребление бортовой аппаратуры за счет уменьшения числа блоков формирования и обработки радиолокационных сигналов и видеоизображения. Однако при данной схеме построения БРЛ и БОВ одновременно производят обработку сигналов только одного блока обнаружения и слежения, что приводит к невозможности одновременного поиска и сопровождения нескольких объектов, а также увеличивает время поиска в связи с последовательной работой БОС.

Схема построения бортовой оптико-радиолокационной системы зависит от ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению, которые разработчик конкретного КА предъявляет к аппаратуре, входящей в систему обеспечения безопасности КА.

Проведем оценку средней квадратической погрешности (СКП) измерения дальности до объекта радиолокационными средствами.

Дисперсия оценки времени запаздывания для простейшего радиолокационного сигнала, заданного в виде прямоугольного радиоимпульса, равна [6]:

$$\sigma_T^2 = \frac{\tau_{\text{и}}}{2 \cdot \Delta f \cdot \frac{2 \cdot E_{\text{ПР}}}{N_0}} = \frac{N_0}{4 \cdot \Delta f \cdot P_{\text{ПР}}}, \quad (1)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шума; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса; $P_{\text{ПР}}$ – мощность принятого сигнала; Δf – ширина спектра сигнала; $E_{\text{ПР}}$ – энергия принятого сигнала. Тогда дисперсия погрешности оценки дальности равна

$$\sigma_R^2 = c^2 \cdot \sigma_T^2. \quad (2)$$

где c – скорость распространения радиосигнала в вакууме.

С другой стороны, мощность принимаемого сигнала можно выразить как [7]

$$P_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{и}} \cdot G_{\text{ПЕР}} \cdot A_{\text{ПР}} \cdot \eta \cdot S_{\text{ЭФ}}}{(4 \cdot \pi \cdot \rho^2)^2}, \quad (3)$$

где $P_{\text{и}}$ – мощность излученного сигнала; $G_{\text{ПЕР}}$ – коэффициент усиления передающей антенны; $A_{\text{ПР}}$ – эффективная площадь приемной антенны; η – КПД антенны; $S_{\text{ЭФ}}$ – площадь эффективной поверхности отражения объекта; ρ – дальность до объекта.

Коэффициент усиления антенны связан с коэффициентом направленного действия следующим соотношением:

$$G = D \cdot \eta, \quad (4)$$

где D – коэффициент направленного действия антенны (КНД); η – КПД антенны.

Эффективная площадь приемной антенны связана с ее коэффициентом направленного действия и длиной волны сигнала λ следующим образом [8]:

$$A = \frac{D \cdot \lambda^2}{4\pi}. \quad (5)$$

Таким образом, СКП измерения дальности рассматриваемой бортовой РЛС определяется как

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{N_0}{\Delta f \cdot P_{\text{ПР}}}} = \\ &= 4 \cdot \sqrt{\pi^3} \cdot \rho^2 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{N_0}{\Delta f \cdot P_{\text{и}} \cdot D^2 \cdot \eta^2 \cdot S_{\text{ЭФ}}}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $f = c/\lambda$ – частота заполнения радиолокационного сигнала.

Коэффициент усиления зеркальной антенны и КНД можно определить как

$$G = \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot g_{\text{Э}}, \quad D = \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot \nu_{\text{исп}}. \quad (7)$$

где d – диаметр антенны; $g_{\text{Э}} = \eta \cdot \nu_{\text{исп}}$ – эффективность зеркальной антенны; $\nu_{\text{исп}}$ – коэффициент использования поверхности раскрыва зеркальной антенны.

Расчет СКП измерения дальности проведен с использованием следующих исходных данных. Мощность излучаемого одиночного радиоимпульса принимается равной 6 кВт, несущая частота – равной 30 ГГц, а ширина спектра – 10 МГц (при длительности импульса 0,1 мкс), что соответствует сигналам, формируемым современными магнетронами с повышенным временем наработки на отказ [9]. Спектральная плотность шума для космической среды принимается равной $N_0 = 10^{-20}$ Вт/Гц (–200 дБВт/Гц). Коэффициент использования поверхности принимается равным 0,5, что обусловлено необходимостью минимизировать обратное излучение антенной системы [8]. КПД антенно-фидерной системы принимается равным 0,7. Для антенны с диаметром 0,3 м КНД на указанной частоте равен 36 дБ, а ширина диаграммы направленности равна 2,6°.

График зависимости СКП измерения дальности от дальности до объекта и эффективной площади рассеяния объекта представлен на рис. 4. При измерении дальности по пачке из N радиоимпульсов, СКП измерения дальности уменьшается в корень из N раз.

Расчет показывает, что радиолокационные средства БОРЛС будут иметь приемлемые значения погрешности измерения дальности при относительно малых габаритах приемо-передающей антенны. Для

уменьшения значения этой погрешности возможно как изменение размеров антенны и увеличение излучаемой мощности, так и расширение полосы частот сигнала за счет применения внутриимпульсной модуляции.

Погрешность измерения угловых координат объекта будет зависеть от разрешающей способности видеокамеры, погрешностей измерения датчиков направления и конструктивных особенностей разрабатываемой аппаратуры. Оценки показывают, что СКП измерения угловых координат для оптического метода может лежать в диапазоне 3–5 угловых минут.

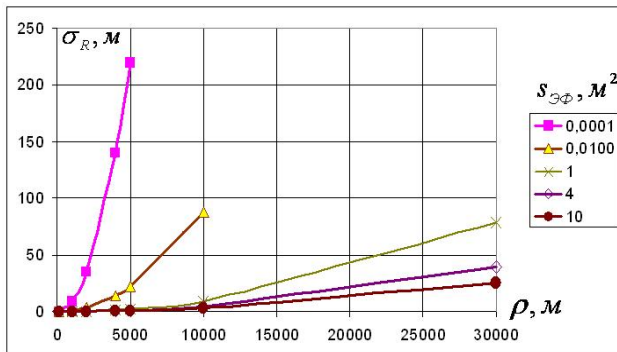


Рис. 4. Зависимость среднеквадратической погрешности измерения дальности от дальности до объекта и эффективной площади рассеяния объекта

Мощность, потребляемая наземным мобильным приемопередающим радиолокационным устройством с аналогичными характеристиками [10], составляет 60 Вт, а масса не превышает 30 кг. Предварительные оценки показывают, что энергопотребление БОРЛС в целом может лежать в диапазоне от 60 до 100 Вт, а масса – в диапазоне от 50 до 70 кг в зависимости от схемы построения системы. Следует заметить, что ресурс современных магнетронов и других активных СВЧ-элементов недостаточен для функционирования в течение всего срока активного существования КА. Поэтому в БОРЛС должно быть предусмотрено многократное резервирование активных элементов с целью обеспечения требуемого ресурса работы.

В статье рассмотрена бортовая оптико-радиолокационная система контроля окружающего пространства космического аппарата. Точностные характеристики, энергопотребление и масса предлагаемой системы являются приемлемыми для использования БОРЛС в составе бортового оборудования геостационарного космического аппарата.

Разработка бортовых систем обеспечения безопасности движения геостационарных КА в настоящее время является перспективной задачей, поэтому предлагаемая схема построения бортовой системы обнаружения и определения координат объектов может найти широкое применение на космических аппаратах отечественного производства.

Бортовые системы обнаружения космических объектов и определения их координат, размещенные на различных космических аппаратах, могут стать ча-

стью космического сегмента глобальной системы космического мониторинга и, совместно с наземным сегментом, решать задачи контроля околоземного пространства и обеспечения безопасности космических полетов.

Библиографические ссылки

1. Словарь космических терминов. Космический мусор [Электронный ресурс]. URL: <http://www.federal-space.ru/main.php?id=11&did=437> (дата обращения: 01.09.2013).
2. Рыхлова Л. В. Проблемы космического мусора [Электронный ресурс]. URL: <http://epizodsspace.no-ip.org/bibl/ziv/1993/6/musor.html> (дата обращения: 01.09.2013).
3. Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области / А. Е. Вольвач, В. В. Румянцев, И. Е. Молотов и др. [Электронный ресурс]. URL: <http://lfvn.astronomer.ru/report/0000004/p000004.htm> (дата обращения: 01.09.2013).
4. Булынин Ю. Л., Гречкосеев А. К., Кульков А. Н. Анализ техногенной засоренности космического пространства и опасности этого фактора для функционирования КА // Системный анализ, управление и навигация : тезисы докладов XVIII Междунар. науч. конф. М. : Изд-во МАИ, 2013. 172 с.
5. Марарескул Д. И., Ермолаев М. В. Система обеспечения безопасного управления орбитальным движением космических аппаратов на геостационарной орбите // Безопасность и живучесть технических систем : тр. IV Всерос. конф. В 2 т. Красноярск : Ин-т физики им. Л. В. Киренского СО РАН, 2012. Т. 2.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М. : Советское радио, 1966.
7. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М. : Советское радио, 1970.
8. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев. М. : Радиотехника, 2006.
9. Магнетрон МИ-471 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3705> (дата обращения: 18.08.2013).
10. Радиолокатор разведки наземных и малоскоростных низколетящих целей 111L1 «ЛИС» [Электронный ресурс]. URL: http://www.ust.com.ua/ru/rls/rls_lis1.html (дата обращения: 25.08.2013).

References

1. *Slovar' kosmicheskikh terminov* [Space terms dictionary]. Available at: <http://www.federalspace.ru/main.php?id=11&did=437> (accessed 1 September 2013).
2. Rychlova L. V. *Problemy kosmicheskogo musora* [The problems of space debris]. Available at: <http://epizodsspace.no-ip.org/bibl/ziv/1993/6/musor.html> (accessed 1 September 2013).
3. Vol'vatch A. E., Rumiantsev V. V., Molotov I. E. et al. *Issledovanie fragmentov kosmicheskogo musora v geostatsionarnoj oblasti* [Research of space debris parts

in geostationary area]. Available at: <http://lfvn.astro-nomer.ru/report/0000004/p000004.htm> (accessed 1 September 2013).

4. Bulinin U. L., Grechkoseev A. K., Kulkov A. N. Analysis of man-made space pollution and its treat for GEO satellites operation [*Analiz tekhnogennoj zasorionnosti kosmicheskogo pronstranstva i opasnosti etogo faktora dlja funkcionirovaniya KA*]. 18th International Scientific conf. "System analysis, management and navigation". Heads of reports. Evpatoria 2013, Moscow, MAI publishers, p. 20–21.

5. Marareskul D. I., Ermolaev M. V. GEO satellites transition safety control system [*Sistema obespecheniya bezopasnogo upravleniya orbital'nim dvizheniem kosmicheskikh apparatov na geostatsionarnoy orbite*]. Trudy IV vsrossijskoj konferentsii "Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh system (Proc. 4th All-Russian Technol. Symp. "Safety and durability of technical systems"). Krasnojarsk, 2012, vol. 2, p. 118–123.

6. Tikhonov V. I. *Statisticheskaja radiotekhnika* (Statistical radio engineering). Moscow, Soviet Radio, 1966, 680 p.

7. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* (Theoretical basis of radiolocation). Moscow, Soviet Radio, 1970, 560 p.

8. Voskresenskij D. I. et al. *Ustrojstva SVTch i anten* (Microwave frequency devices and antennas). Moscow, Radio Engineering, 2006, 376 p.

9. Magnetron MI-471. Available at: <http://www.oao-tantal.ru/tovar.php?id=3705> (accessed 18 August 2013).

10. *Radiolocator razvedki nazemnikh i maloskorostnikh tselej 111L1 "LIS"* [Radar for land and low-speed targets detection 111L1 "LIS"]. Available at: http://www.ust.com.ua/ru/rls/rls_lis1.html (accessed 25 August 2013).

© Ермолаев М. В., Марарескул Д. И., Ислентьев Е. В., Алешечкин А. М., 2013

УДК 532.526.4

ТЕПЛОТДАЧА В КАВЕРНЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ЖРД*

А. А. Зуев, М. И. Толстопятов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dla2011@inbox.ru

Предметом работы является теоретическое исследование течения с учетом теплоотдачи в полости вращения между ротором и статором газовой турбины. Для получения зависимостей, позволяющих производить расчет локального коэффициента теплоотдачи в стенку вращающегося диска (ротора) и неподвижную стенку корпуса (статора) использован метод интегральных соотношений. В результате выполненной работы получены зависимости, реализация которых в программное обеспечение позволит производить расчет тепловых потоков в элементы конструкции осевой газовой турбины. Сравнительный анализ с теориями различных авторов при расчете локального коэффициента теплоотдачи в стенку вращающегося диска дал удовлетворительную сходимость. Сравнительный анализ полученных зависимостей показал, что больший коэффициент теплоотдачи от вращающегося в каверне потока в стенку статора, нежели ротора.

Ключевые слова: каверна газовой турбины, полость вращения, вращательное течение, уравнение энергии, коэффициент теплоотдачи.

HEAT TRANSFER IN THE CAVITY OF A GAS TURBINE LIQUID ROCKET ENGINE

A. A. Zuev, M. I. Tolstopyatov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: dla2011@inbox.ru

The subject of the study is the theoretical research of the process in consideration with heat emission in the cavity rotation between the rotor and the stator of a gas turbine. For the result of the dependency which allows to make a calculation of the local heat emission coefficient in the wall of a rotation disk (rotor) and the fixed wall of the framework (stator), the method of the integral ratios is used. As a result of the performed work, the dependency has been brought out. Realization of the dependency into the software will make the calculation of the heat currents in the axial elements of the construction of a gas turbine.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1835.

The comparative analysis with the theories of different authors along with the calculation of the local heat emission coefficient into the wall of the rotation disk has given the satisfactory convergence. The comparative analysis of the dependency showed higher coefficient of the heat emission from a rotating flow in the cavern into the wall of the stator than the rotor did.

Keywords: gas turbine cavity, the cavity of the rotation, the rotational flow, the energy equation, heat transfer coefficient.

При проектировании энергетических установок летательных аппаратов необходимо учитывать большое число факторов, влияющих на надежность и энергоэффективность изделия. Одним из таких факторов являются тепловые потоки, образующиеся в результате теплоотдачи и трения газового потока при течении в газовых магистралях энергоустановок. Неучтенное в расчете тепло при проектировании узлов и агрегатов влияет на теплофизические свойства рабочего тела. Нерасчетные величины вязкости и плотности рабочего тела могут вывести рабочие параметры за предел расчетного объема работы установки, который для получения максимального КПД имеет довольно узкий диапазон величин [1]. Широкая классификация закрученных потоков встречается в энергетических установках летательных аппаратов, это обусловлено интенсивностью протекающих динамических и тепловых процессов. Вращательные и закрученные потоки часто используются для интенсификации теплообмена в различных энергетических установках, в том числе в теплообменных аппаратах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [2; 3]. Вращательное течение также характерно для подводящих и отводящих устройств газовых турбин и насосов ЖРД, полостей между ротором и статором турбин, торцевых щелей между вращающимся диском и корпусом, полостей гидродинамических уплотнений [4]. Актуальность исследования теплоотдачи в кавернах газовых турбин подтверждается многочисленными исследованиями в этом направлении [5–10].

Течение вблизи плоского диска радиусом r , равномерно вращающегося в покоящейся жидкости с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, перпендикулярной к плоскости диска, является одним из примеров точного решения уравнения Навье–Стокса [11].

При рассмотрении течения в полости вращения (каверне) необходимо разделить задачу на течение у вращающегося диска, и течение рабочего тела у неподвижного основания [6]. Для получения аналитического решения теплоотдачи при ламинарном течении потока рабочего тела у вращающегося диска, используется интегральное соотношение уравнения энергии пространственного пограничного слоя, полученное путем интегрирования дифференциального уравнения энергии по толщине пограничного слоя в [12]. Без учета диссипативного члена в правой части соотношение примет вид

$$\frac{1}{H_\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \delta_{t\phi}^{**} + \frac{1}{H_\psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \delta_{t\psi}^{**} + \frac{1}{H_\phi H_\psi} \frac{\partial H_\psi}{\partial \phi} \delta_{t\phi}^{**} + \frac{1}{H_\phi H_\psi} \frac{\partial H_\phi}{\partial \psi} \delta_{t\psi}^{**} = St, \quad (1)$$

где ϕ и ψ – продольная и поперечная координаты; H_ψ и H_ϕ – коэффициенты Ламе; $\delta_{t\psi}^{**}$ – толщина потери энергии в поперечном направлении течения; $\delta_{t\phi}^{**}$ – толщина потери энергии в продольном направлении течения. Толщина потери энергии потока в продольном направлении течения:

$$\delta_{t\phi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (2)$$

На рис. 1 представлено распределение относительного изменения профиля скорости и температуры в ламинарном пограничном слое для случая $Pr < 1$, что характерно для реальных рабочих тел газовой турбины. Толщина динамического пограничного слоя δ утоплена в толщине температурного пограничного слоя δ_t , T – температура в толщине пограничного слоя; $T_0 \neq$ – температура обтекаемой поверхности, u – скорость в пограничном слое; U – скорость вне пограничного слоя.

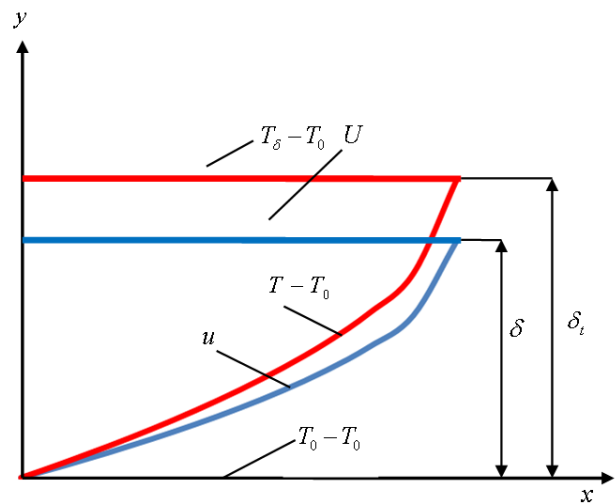


Рис. 1. Распределение профилей скорости и температуры в ламинарном пограничном слое при $Pr < 1$

При определении толщины потери энергии в продольном направлении потока для случая описания безразмерного профиля скорости и температуры используется функция [6; 13]

$$\frac{u}{U} = 1 - \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2; \quad \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} = 1 - \left(1 - \frac{y}{\delta_t} \right)^2. \quad (3)$$

С учетом отношения толщины температурного пограничного слоя к динамическому $\Delta = \delta / \delta_t = Pr^{1/3}$ [14], а также функций (3) получено выражение для

определения толщины потери энергии в продольном направлении

$$\delta_{t\varphi}^{**} = \frac{\delta(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{30\Delta}. \quad (4)$$

При вычислении толщины потери энергии в продольном направлении (2) согласно принятой модели распределения профилей скорости и температуры, пределы интегрирования были разбиты на два участка: от 0 до толщины динамического пограничного слоя δ и от δ до толщины температурного пограничного слоя δ_t .

Закон теплообмена в виде критерия Стантона, входящий в левую часть интегрального соотношения (1), требует определения производной на поверхности теплообмена по функции температуры (3):

$$\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) \right]_{y=0} = \frac{2}{\delta_t} = \frac{2\Delta}{\delta}. \quad (5)$$

Выразив из (4) толщину динамического пограничного слоя δ и проведя подстановку в (5), закон теплообмена можно записать в виде

$$St = \frac{\lambda}{\rho C_p U} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) \right]_{y=0} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (6)$$

Для перехода к решению задачи конвективного теплообмена при реализации вращательных течений необходимо при рассмотрении интегрального соотношения уравнения энергии (1) перейти к цилиндрическим координатам. Учтем, что при вращательном осесимметричном течении (линия тока – кольцевая линия): $\varphi = \alpha$; $\psi = R$. Коэффициенты Ламе для цилиндрических координат $H_\varphi = H_\alpha = R$; $H_\psi = H_R = 1$ [15], тогда производная для коэффициентов Ламе определяется как

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} = \frac{\partial H_\alpha}{\partial R} = \frac{\partial R}{\partial R} = 1; \quad \frac{\partial H_\psi}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial \alpha} = 0. \quad (7)$$

С учетом (7) и закона теплообмена в виде критерия Стантона (6) интегральное соотношение (1) уравнения энергии запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\psi}^{**} + \frac{\delta_{t\psi}^{**}}{R} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (8)$$

Для получения аналитического решения соотношения (8) необходимо установить связь между толщиной потери энергии в продольном направлении $\delta_{t\varphi}^{**}$ и входящей в левую часть соотношения толщиной потери энергии в поперечном направлении $\delta_{t\psi}^{**}$. Толщина потери энергии в поперечном направлении в общем виде описывается выражением

$$\delta_{t\psi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \frac{w}{U} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (9)$$

где w – скорость потока в поперечном направлении. Профиль скорости, дающий связь между скоростью

потока в поперечном направлении w и скоростью потока в продольном направлении U , установил Г. Ю. Степанов [16]

$$w = U \varepsilon \frac{u}{U} \left(1 - \left(\frac{u}{U} \right)^3 \right), \quad (10)$$

где ε – тангенс угла скоса донных линий тока. Выражение (9) для толщины потери энергии в поперечном направлении потока с учетом (10) примет вид

$$\delta_{t\psi}^{**} = \int_0^{\delta_t} \varepsilon \frac{u}{U} \left(1 - \left(\frac{u}{U} \right)^3 \right) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_\delta - T_0} \right) dy. \quad (11)$$

Вычисление (11) производится аналогично (2). После несложных вычислений и преобразований получено выражение для определения толщины потери энергии в поперечном направлении потока:

$$\delta_{t\psi}^{**} = \varepsilon \left(\frac{\delta_t}{3} - \frac{233\delta}{315} + \frac{491\delta^2}{630\delta_t} - \frac{213\delta^3}{770\delta_t^3} \right). \quad (12)$$

Связь между толщиной потери энергии в поперечном направлении $\delta_{t\psi}^{**}$ (12) и толщиной потери энергии в продольном направлении $\delta_{t\varphi}^{**}$ (4) устанавливается путем введения относительной характерной толщины температурного пространственного пограничного слоя I , аналогичное отношение использовано в [16], с учетом $\Delta = \delta/\delta_t = \text{Pr}^{1/3}$ имеем:

$$I = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\delta_{t\psi}^{**}}{\delta_{t\varphi}^{**}} = \frac{(8,3\Delta^3 - 23,38\Delta^2 + 22,19\Delta - 10)}{(\Delta^3 - 5\Delta^2 + 10\Delta - 10)}. \quad (13)$$

Относительная характерная толщина зависит только от выбранных функций аппроксимирования относительного изменения скорости и температуры в пограничном слое и отношения толщины динамического и температурного пограничных слоев. С учетом относительной характерной толщины (13) интегральное соотношение (7) для течения с ламинарным пограничным слоем можно записать в другом виде:

$$I \varepsilon \frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\varphi}^{**} + \frac{I \varepsilon}{R} \delta_{t\varphi}^{**} = \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15\delta_{t\varphi}^{**} \rho C_p U}. \quad (14)$$

Рассмотрим случай вращательного течения газового потока в торцевой щели между ротором и статором лопаточной машины. Известно, что распределение окружной составляющей скорости потока по закону твердого тела характерно для диска, вращающегося в ограниченном пространстве. Аналогичный режим реализуется между вращающимся диском лопаточной машины и неподвижной стенкой корпуса. Согласно закону вращения твердого тела окружная составляющая скорости внешнего потока

$$U = \omega R. \quad (15)$$

С учетом (15) интегральное соотношение уравнения энергии пространственного пограничного слоя (14) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial R} \delta_{t\varphi}^{**} + \frac{\delta_{t\varphi}^{**}}{R} - \frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15I \varepsilon \rho C_p \omega} \frac{1}{\delta_{t\varphi}^{**} R} = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) решается как линейное дифференциальное уравнение первого порядка, в результате решения получено выражение для определения толщины потери энергии в продольном направлении потока $\delta_{тф}^{**}$:

$$\delta_{тф}^{**} = \sqrt{\frac{\lambda(10 - 10\Delta + 5\Delta^2 - \Delta^3)}{15I\epsilon\rho C_p\omega}}. \quad (17)$$

С учетом (17) локальный закон теплообмена (6) можно записать в виде пригодном для численного интегрирования по радиусу торцевой щели:

$$St = 0,258 \sqrt{\frac{\lambda\epsilon(23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)}{C_p\omega R^2}}. \quad (18)$$

Следует отметить, что характер течения у неподвижной стенки (статора) может существенно отличаться от характера течения у вращающегося диска (ротора) [5]. В работе [6] получены выражения для определения величин ϵ – тангенса угла скоса донных линий для случая вращательного течения по закону «твердого тела» над неподвижным основанием (статором), и для случая вращающегося диска (ротора) в потоке, закрученном по закону твердого тела. При преобразовании (18) к критериальному виду учтем,

что $Re_\omega = \frac{\rho\omega R^2}{\mu} = \frac{\omega R^2}{\nu}$ и $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$; $Nu = St Re Pr$,

а также известные значения ϵ – тангенса угла скоса донных линий тока [6]. Локальный коэффициент теплоотдачи в неподвижную стенку (статор) от потока, увлекаемого вращающимся диском

$$Nu = 0,297 Re_\omega^{0,5} Pr^{0,5} \times (23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)^{0,5}. \quad (19)$$

Локальный коэффициент теплоотдачи в стенку диска, вращающегося в потоке, закрученном по закону твердого тела

$$Nu = 0,23 Re_\omega^{0,5} Pr^{0,5} \times (23,38Pr^{0,66} - 8,3Pr - 22,19Pr^{0,33} + 10)^{0,5}. \quad (20)$$

На рис. 2 изображены графические зависимости теорий различных авторов для определения локальных чисел Нуссельта при ламинарном режиме течения в каверне, а также зависимости (19) и (20). Среднее максимальное расхождение зависимости (20) с теориями других авторов при расчете локальной теплоотдачи в стенку вращающегося в каверне диска составляет 0,2 %. Многие авторы рекомендуют при расчете теплоотдачи в неподвижную стенку (статор) использовать зависимости, полученные для случая вращающегося диска. Возможно такой подход применим для случая слившихся пограничных слоев на роторе и статоре. При реализации между пограничными слоями ядра течения, расчет тепловых потоков по зависимости (20) может накладывать существенную ошибку. Среднее максимальное расхождение зависи-

мости (19) с теориями других авторов составляет 20 %, что весьма существенно.

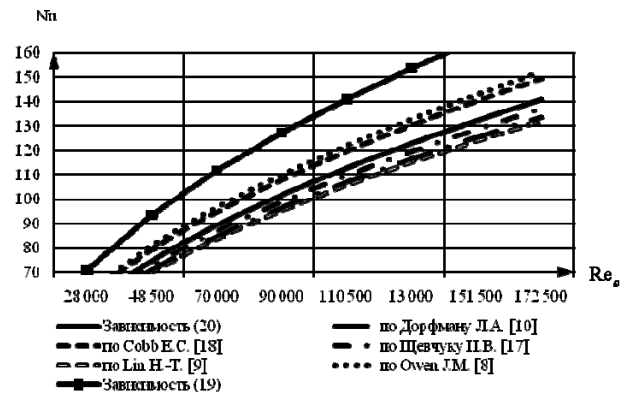


Рис. 2. Сравнение различных теорий для определения локальных чисел Нуссельта при ламинарном режиме течения в каверне газовой турбины

Полученные зависимости применимы для случая вращательного течения в полости между вращающимся диском турбины и корпусом при числах Рейнольдса $Re_\omega \leq 1,8 \cdot 10^5$ [17]. Зависимости применимы для случая, когда ламинарные пограничные слои на статоре и роторе разделяются слоем рабочего тела, в котором влияние вязкости является достаточно малым. Между пограничными слоями находится слой жидкости, который вращается с угловой скоростью, приблизительно равной половине угловой скорости вращения диска [5].

Библиографические ссылки

1. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстомятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4(44). С. 134–138.
2. Громыко Б. М., Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 1. Кожухотрубчатый испаритель азота двигателя РД107 // Тр. НПО «Энергомаш». 2006. № 24. С. 246–255.
3. Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты – носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Тр. НПО «Энергомаш». № 24 / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. Москва, 2006. 420 с.
4. Зуев А. А., Толстомятов М. И., Жуйков Д. А. Установка для экспериментального исследования теплоотдачи вращательного течения газа // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2(48). С. 189–192.
5. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М.: Физматлит, 2010. 488 с.
6. Теория пространственного пограничного слоя в гидродинамике турбомашин: монография / А. А. Кишкин, В. П. Назаров, Д. А. Жуйков и др.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. 250 с.

7. Shevchuk I. V. Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. 2009. 235 p. Springer.
8. Owen J. M., Rogers R. H. Flow and heat transfer in rotating disc systems. Rotor-stator systems. Taunton: Research Studies Press, 1989.
9. Lin H.-T., Lin H.-K. Heat transfer from a rotating cone or disk to fluids of any Prandtl number. Int.Comm.Heat and Mass Transfer. 14 N 3. P. 323–332.
10. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960. 260 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 711 с.
12. Интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя / А. А. Зуев и др. // Вестник Рыбинской гос. авиационной технол. академии 2010. № 2(17). С. 37–42.
13. Кишкин А. А., Мелкозеров М. Г., Зуев А. А. Течение с теплоотдачей в элементах турбомашин и теплоэнергетических устройств: теоретические основы : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 196 с.
14. Четкин А. В., Занемонец Н. А. Теплотехника. М. : Высш. шк., 1986. 344 с.
15. Кочин И. Е., Кибель А. И., Розе М. В. Теоретическая гидромеханика : в 2 ч. Ч. 1. М. : Физматгиз, 1963. 584 с.
16. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М. : Физматгиз, 1962. 512 с.
17. Халатов А. А., Авраменко А. А., Щевчук И. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил : в 4. т. Т. 2. Вращающиеся системы. 1996. 289 с.
- (Flow and heat transfer in rotating channels and cavities). Moscow, Fizmatlit, 2010, 488 p.
6. Kishkin A. A., Nazarov V. P., Zhuykov D. A. et al. *Teoriya prostranstvennogo pogranichnogo sloya v gidrodinamike turbomashin* (Dimensional boundary layer theory in hydrodynamics turbomachinery), monograph. Sib. State. Aerospace. Univ. Krasnoyarsk, 2013, 250 p.
7. Shevchuk I. V. Convective Heat and Mass Transfer in Rotating Disk Systems. 2009. 235 p. Springer.
8. Owen J. M., Rogers R. H. Flow and heat transfer in rotating disc systems. Rotor-stator systems. Taunton, Research Studies Press, 1989.
9. Lin H.-T., Lin H.-K. Heat transfer from a rotating cone or disk to fluids of any Prandtl number. Int.Comm.Heat and Mass Transfer. 14 N 3. P. 323–332.
10. Dorfman L. A. *Gidrodinamicheskoe soprotivleniye i teplootdacha vrashchayushchikhsya tel* (Pressure drop and heat transfer of rotating bodies). Moscow, Fizmatgiz, 1960, 260 p.
11. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* (Boundary-layer theory). Moscow, Nauka, 1974, 711 p.
12. Zuev A. A. et al. *Vestnik Rybinskoy gos. aviatsionnoy tekhnol. akademii imeni P. A. Solov'eva*. 2010. № 2(17), p. 37–42.
13. Kishkin A. A., Melkozerov M. G., Zuev A. A. *Techenie s teplootdachey v elementakh turbomashin i teploenergeticheskikh ustroystv: teoreticheskie osnovy* (Flow with heat transfer elements in the turbomachinery and heat power devices: theoretical foundations), monograph. Sib. State. Aerospace. Univ. Krasnoyarsk, 2010, 196 p.
14. Chechetkin A. V., Zanemonets N. A. *Teplotekhnika* (Thermotechnics). Moscow, Vyssh. shk., 1986, 344 p.
15. Kochin I. E., Kibel A. I., Roze M. V. *Teoreticheskaya gidromekhanika* (Theoretical Hydro-mechanics). Part 1. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 584 p.
16. Stepanov G. *Gidrodinamika reshetok turbomashin* (Hydrodynamics lattices turbomachinery). Moscow, Fizmatgiz, 1962, 512 p.
17. Khalatov A. A., Avramenko A. A., Shchevchuk I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil. T. 2. Vrashchayushchiesya sistemy* (Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. Vol. 2. Rotating system). 1996, 289 p.

© Зуев А. А., Толстомятов М. И., 2013

References

1. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4(44), p. 134–138.
2. Gromyko M. B., Klyueva O. G. *Trudy NPO Energomash*. 2006, № 24, p. 246–255.
3. Klyueva O. G. *Trudy NPO Energomash*. 2006, 24, p. 256–271.
4. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4(44), p. 134–138.
5. Volkov K. N., Emel'yanov V. N. *Techeniya i teploobmen v kanalakakh i vrashchayushchikhsya polostyakh*

УДК 629.7.036.54

ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТЯГОЙ ОТ 10 ДО 420 Н

А. И. Коломенцев, А. Н. Хохлов

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru, Alexey.hohlov.86@gmail.com

Для двигателей S10 тягой 10 Н и S400 тягой 420 Н, разработанных в EADS Astrium, построены матрицы планирования для построения регрессионных моделей удельного импульса тяги. Результаты экспериментов обработаны с помощью специально разработанного программного обеспечения по приведенной методике обработки. Построены адекватные регрессионные модели удельного импульса тяги для данных двигателей. Проведен анализ построенных регрессионных моделей в графическом виде. Сделан вывод о влиянии горючего на регрессионные модели с увеличением тяги двигателя. Разработано и апробировано специальное программное обеспечение для планирования эксперимента и статистической обработки результатов.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель малой тяги, регрессионный анализ, программное обеспечение, статистическая обработка, удельный импульс тяги.

THE DESIGN OF THE EXPERIMENT AND CREATION OF THE REGRESSION MODEL OF THE SPECIFIC IMPULSE LIQUID ROCKET ENGINE THRUST FROM 10 TO 420 N

A. I. Kolomentsev, A. N. Khokhlov

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru, Alexey.hohlov.86@gmail.com

For the engine S10 with the thrust 10 N and the engine S400 with the thrust 420 N developed by EADS Astrium, the matrix planning to create the regression models of specific impulse has been built. The experimental results are processed with the help of the specially developed software at the present method of treatment. An adequate regression models of the specific impulse for the engines are created. The analysis of regression models is built in the graphical form. It is concluded that the fuel has an impact on the regression models with an increasing engine thrust. A special software for the experimental design and statistical analysis of the results has been developed and tested.

Keywords: liquid rocket thruster, regression analysis, software, statistical analysis, the specific impulse.

Описание двигателей S10 и S400. В EADS Astrium разработаны, прошли экспериментальную отработку и поставлены для летных испытаний двигатели S10 с тягой 10 Н и S400 с тягой 420 Н на компонентах топлива монометилгидразин (ММГ)+азотный тетраоксид (АТ). Для космических аппаратов (КА) AFRISTAR (1998), Stellan (2002), EUROSTAR 2015 (2008), Astra 1N (2011) и т. д. разработаны модификации двигателя S10-21 (рис. 1), S10-18 и S10-26 [1]. Для КА SYMPHONIE (1975), AMOS 1 (1996), ARTEMIS (2001), Venus Express (2005), W2A (2009), Yamal 402 (2013), W3D (2013) и т. д. разработаны модификации двигателя S400-12 (рис. 2) и S400-15 [2].

Двигатели работают при номинальных суммарных массовых расходах $\dot{m}_c \approx 3,4$ г/с (S10), $\dot{m}_c \approx 125$ г/с (S400) и соотношении компонентов топлива $K_m \approx 1,68$ и $K_m \approx 1,61$ соответственно.

Матрица планирования испытаний двигателей S10 и S400. Испытания для построения регрессионной модели 2-го порядка для удельного импульса (n – количество опытов с учетом рандомизации, N – количество неповторных опытов строки матрицы планиро-

вания, i – номер опыта (строки) матрицы планирования, $\dot{m}_o$ – массовый расход окислителя, $\dot{m}_2$ – массовый расход горючего) планируются по матрицам планирования испытаний ЖРДМТ S10 и S400, приведенных в табл. 1, 2.

Методика обработки результатов испытаний. Оценка параметров регрессионной модели производится по результатам испытаний, проведенных в соответствии с заданной матрицей планирования факторного эксперимента, в следующей последовательности:

- 1) оценка воспроизводимости (ошибки опыта) и стационарности;
- 2) расчет коэффициентов регрессионной модели и проверка их на значимость;
- 3) проверка регрессионной модели на адекватность.

Проверка воспроизводимости и стационарности опытов. Оценка воспроизводимости производится из условия однородности дисперсий выходного параметра, определенного в разных строчках матрицы планирования:

$$D(y_i) = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} [(y_i)_{\text{ср}} - y_{i,j}]^2, \quad (1)$$

где m_i – число параллельных опытов в i -й строке матрицы; $(y_i)_{\text{ср}} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{i,j}$ – средняя величина выходного параметра для совокупности проведенных опытов при данном сочетании факторов; $y_{i,j}$ – результат j -го опыта в i -й строке матрицы.

Проверка однородности дисперсий производится с помощью F -критерия. В соответствии с F -критерием дисперсии двух результатов считаются отличающи-

мися статистически незначимо, если выполнено условие

$$F_{\text{эсп}} = \frac{D(y)_{\text{max}}}{D(y)_{\text{min}}} < F_{\text{табл}}(\alpha, f_{\text{max}}, f_{\text{min}}), \quad (2)$$

где $F_{\text{табл}}$ – табличное значение F -критерия, т. е. предельное отношение дисперсий; α – уровень значимости, т. е. вероятность ошибочного вывода, которая в технических задачах принимается равной 0,05; $f_i = m_i - 1$ – степень свободы; $D(y)_{\text{max}}$ и $D(y)_{\text{min}}$ – максимальное и минимальное значения дисперсий, определенных по соотношению (1).



Рис. 1. Общий вид двигателя S10-21



Рис. 2. Общий вид двигателя S400-12

Матрица планирования испытаний двигателя S10

Таблица 1

N	Случайный порядок опытов, n	$\dot{m}_o$		$\dot{m}_e$	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	2,41	+	1,42
	6				
2	8	+	2,41	–	1,09
	15				
3	3	–	1,86	+	1,42
	9				
4	4	–	1,86	–	1,09
	13				
5	2	0	2,135	+	1,42
	12				
6	10	+	2,41	0	1,255
	16				
7	5	–	1,86	0	1,255
	7				
8	11	0	2,135	–	1,09
	17				
9	14	0	2,135	0	1,255
	18				

Таблица 2

Матрица планирования испытаний двигателя S400

N	Случайный поряд- док опытов, n	$\dot{m}_o$		$\dot{m}_e$	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	82,3	+	51,4
	6				
2	8	+	82,3	–	44,7
	15				
3	3	–	71,5	+	51,4
	9				
4	4	–	71,5	–	44,7
	13				
5	2	0	76,9	+	51,4
	12				
6	10	+	82,3	0	48,05
	16				
7	5	–	71,5	0	48,05
	7				
8	11	0	76,9	–	44,7
	17				
9	14	0	76,9	0	48,05
	18				

Оценка стационарности также производится с использованием F -критерия:

$$F_{\text{экс}} = \frac{D(y_{\text{cp}})}{D_{\text{воспр}}} < F_{\text{табл}}(\alpha, f_{y_{\text{cp}}}, f_{\text{воспр}}), \quad (3)$$

где $y_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)_{\text{cp}}$ – среднее значение выходного параметра во всех проведенных опытах;

$$D(y_{\text{cp}}) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [y_{\text{cp}} - (y_i)_{\text{cp}}]^2; \quad D_{\text{воспр}} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i D(y_i)}{\sum_{i=1}^N f_i} -$$

дисперсия воспроизводимости.

Расчет коэффициентов регрессии и проверка их на значимость. Расчет коэффициентов регрессии производится по методу наименьших квадратов:

$$\{B\} = [\{X\}^T \{X\}]^{-1} \{X\}^T \{Y\}, \quad (4)$$

где (например, для линейных моделей, числа входных факторов k и числа опытов n):

$$\{B\} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}; \quad \{X\} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \cdots & x_{Nk} \end{bmatrix}; \quad \{Y\} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}.$$

Матрица $\{X\}^T$ – транспонированная матрица по отношению к $\{X\}$.

Проверка коэффициентов регрессионной модели на значимость проводится по критерию Стьюдента t при заданном уровне значимости α .

Значимые коэффициенты регрессии должны быть больше доверительного интервала Δb :

$$b_i > \Delta b = t_{\alpha} S_b, \quad (5)$$

где t_{α} – критерий Стьюдента; $S_b = \sqrt{\frac{D_{\text{воспр}}}{N}}$ – средне-квадратическое отклонение коэффициентов регрессии.

Если коэффициенты взаимно коррелированы, то после исключения незначимых, остальные коэффициенты регрессии пересчитываются.

Проверка адекватности регрессионной модели. Под проверкой адекватности понимают проверку соответствия модели экспериментальным данным. Считается, что регрессионная модель адекватна исследуемому процессу, если квадраты отклонений экспериментальных точек от рассчитанных по уравнению регрессии лежат в пределах ошибки воспроизводимости.

Проверка адекватности возможна, если количество опытов хотя бы на единицу больше числа значимых коэффициентов регрессии, т. е. число степеней свободы

$$f_{\text{ад}} = N + n_k - N_b,$$

где N – число опытов в матрице планирования; n_k – число контрольных опытов; N_b – число значимых коэффициентов регрессии.

Оценка квадрата отклонения экспериментальных точек от модели называется дисперсией адекватности:

$$D_{\text{ад}} = \frac{1}{f_{\text{ад}}} \sum_{i=1}^{f_{\text{ад}}} [(y_i)_{\text{экс}} - (y_i)_{\text{теор}}]^2,$$

где $(y_i)_{\text{экс}}$ и $(y_i)_{\text{теор}}$ – опытное и расчетное значения выходного параметра.

Дисперсию адекватности сравнивают с дисперсией воспроизводимости с использованием критерия Фишера. Для адекватных регрессионных моделей

$$F_{\text{экс}} = \frac{D_{\text{ад}}}{D_{\text{воспр}}} < F_{\text{табл}}(\alpha, f_{\text{ад}}, f_{\text{воспр}}), \quad (6)$$

где $f_{\text{воспр}}$ – степень свободы для дисперсии воспроизводимости.

При неадекватности модели возможны следующие варианты решения:

- 1) уменьшение интервалов варьирования факторов;
- 2) перенос центра планирования эксперимента;
- 3) использование моделей более высокого порядка.

Для планирования и обработки эксперимента было создано программное обеспечение [3].

Программа предназначена для построения планов (полного и дробного факторных экспериментов, планов Хартли и Бокса–Вилсона) для испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг и построения регрессионных моделей (линейной, квазинелинейной, 2-го порядка) по результатам испытаний.

Входными данными являются: количество входных факторов, число повторных опытов, вид уравнения регрессии, число опытов в центре плана, матрица значений выходного параметра, число контрольных опытов, доверительная вероятность, кодовые значения входных факторов в контрольных опытах.

Программа позволяет проводить статистическую обработку результатов испытаний, т. е. определять число неповторных опытов плана, число коэффициентов регрессии, матрицу планирования в кодовом виде, матрицу планирования со значениями, столбец рандомизации с учетом числа повторных опытов, воспроизводимость и стационарность опытов, вектор коэффициентов регрессии, доверительный интервал для коэффициентов регрессии, адекватность регрессионной модели, расчетные значения выходного параметра в контрольных опытах.

Программа написана в математической среде Mathcad 15.0 (M020 [MC15_M020_20121127]).

Программа разделена на 2 связанных модуля: планирования испытаний и статистической обработки результатов испытаний.

Алгоритм 1 модуля планирования эксперимента в общем виде выглядит следующим образом:

- выбор выходного параметра;
- выбор количества входных факторов;
- назначение интервалов варьирования;
- выбор вида уравнения регрессии (линейная, квазинелинейная, 2-го порядка);
- выбор типа плана (ПФЭ, ДФЭ, план Хартли, план Бокса–Вилсона);
- подсчет количества коэффициентов регрессии и опытов;
- рандомизация;
- построение матрицы планирования в кодовом и размерном виде.

Алгоритм 2 модуля программы статистической обработки результатов:

- ввод численных значений выходного параметра;
- проверка опытов на воспроизводимость и стационарность;
- расчет коэффициентов регрессии;
- проверка коэффициентов регрессии на значимость;
- проверка модели на адекватность.

Программа имеет открытый код и может меняться в зависимости от требований: например, адаптация под другие виды двигателей или добавление других видов планов эксперимента.

Работоспособность программы проверена на нескольких испытаниях ЖРДМТ [1; 2].

Статистическая обработка результатов испытаний двигателей S10 и S400. Заполненные матрицы планирования для двигателей S10 и S400 приведены в табл. 3, 4.

После статистической обработки результатов испытаний регрессионная модель удельного импульса тяги для двигателя S10 выглядит следующим образом:

$$I_y = 291,222 + 3,25\bar{m}_c + 6,875\bar{m}_o\bar{m}_c - 5,333\bar{m}_o^2, \quad (7)$$

где $\bar{m}_c$ и $\bar{m}_o$ – массовые расходы горючего и окислителя в безразмерном (кодовом) виде.

Таблица 3

Двигатель S10

N	Случайный порядок опытов, n	$\bar{m}_o$		$\bar{m}_c$		$I_{y_i}, \text{с}$	$I_{y_i, \text{ср}}, \text{с}$
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	2,41	+	1,42	290	292
	6					294	
2	8	+	2,41	–	1,09	274	275.5
	15					277	
3	3	–	1,86	+	1,42	280	282
	9					284	
4	4	–	1,86	–	1,09	291	293
	13					295	
5	2	0	2,135	+	1,42	298	300
	12					302	
6	10	+	2,41	0	1,255	294	295
	16					296	
7	5	–	1,86	0	1,255	280	279.5
	7					279	
8	11	0	2,135	–	1,09	285	286
	17					287	
9	14	0	2,135	0	1,255	289	288.5
	18					288	

Двигатель S400

N	Случайный порядок опытов	$\dot{m}_o$		$\dot{m}_z$		I_{yi}, c	$I_{yi,sp}, c$
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	82,3	+	51,4	321	319
	6					317	
2	8	+	82,3	–	44,7	322	321,5
	15					321	
3	3	–	71,5	+	51,4	313	312
	9					311	
4	4	–	71,5	–	44,7	315	314
	13					313	
5	2	0	76,9	+	51,4	318	317
	12					316	
6	10	+	82,3	0	48,05	319	318,5
	16					318	
7	5	-	71,5	0	48,05	314	313,5
	7					313	
8	11	0	76,9	–	44,7	315	314,5
	17					314	
9	14	0	76,9	0	48,05	317	316,5
	18					316	

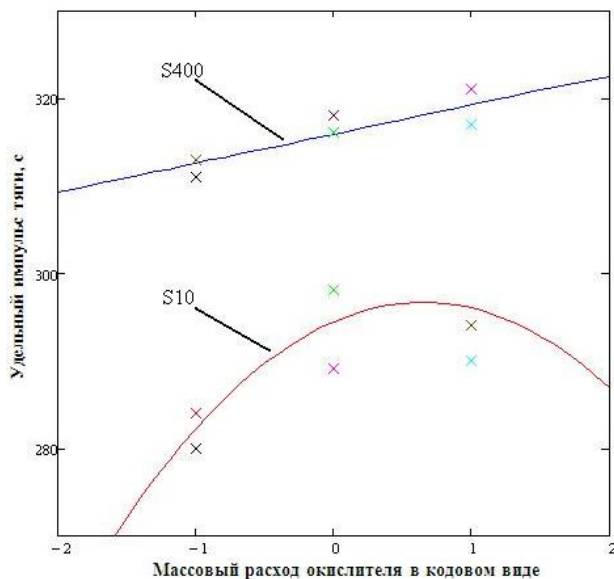


Рис. 3. Удельный импульс тяги двигателей S10 и S400 в зависимости от расхода горючего при постоянном расходе окислителя 2,41 и 76,9 г/с соответственно: — расчетная модель; x – экспериментальные точки

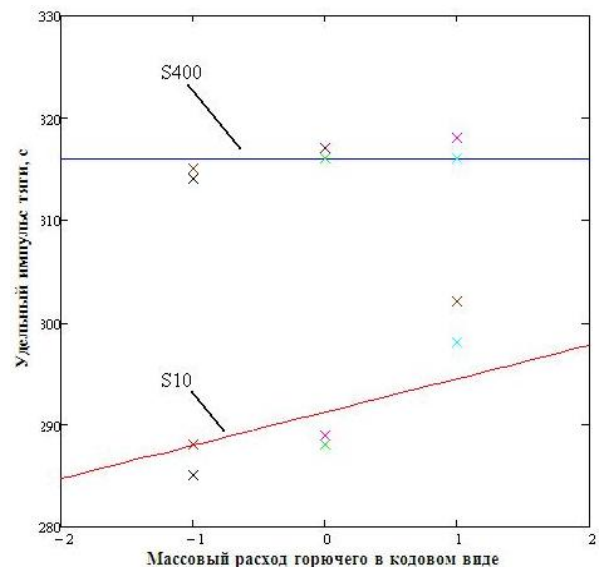


Рис. 4. Удельный импульс тяги двигателей S10 и S400 в зависимости от расхода окислителя при постоянном расходе горючего 1,42 и 51,4 г/с соответственно: — расчетная модель; x – экспериментальные точки

После статистической обработки результатов испытаний регрессионная модель удельного импульса тяги для двигателя S400 выглядит следующим образом:

$$I_y = 315,89 + 3,325\dot{m}_o. \quad (8)$$

На рис. 3, 4 представлены графики удельного импульса тяги в зависимости от расхода горючего и окислителя для двух двигателей. Как видно из рис. 3, 4, с увеличением тяги влияние горючего на регрессионную модель уменьшается при одинаковом соотношении компонентов.

Проведенная апробация разработанного программного обеспечения для планирования экспери-

мента и статистической обработки результатов испытаний ЖРДМТ показала его работоспособность и хорошее согласование с экспериментальными данными.

Библиографические ссылки

1. EADS Astrium, двигатель S10 [Электронный ресурс]. URL: <http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/thrusters/10N%20Thruster.pdf>.
2. EADS Astrium, двигатель S400 [Электронный ресурс]. URL: <http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/apogee-engines/400N%20Engine.pdf>.
3. А. с. о регистрации программы для ЭВМ

№ 2013615794 «Планирование и обработка результатов испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг» / А. И. Коломенцев, А. Н. Хохлов ; 2013.

References

1. EADS Astrium, Dvigatel' S10 (Engine S10). Available at: <http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/thrusters/10N%20Thruster.pdf>.

2. EADS Astrium, Dvigatel' S400 (Engine S400). Available at: <http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/apogee-engines/400N%20Engine.pdf>.

3. Kolomentsev A. I., Khokhlov A. N. *Planirovanie i obrabotka rezultatov ispytaniy zhidkostnykh raketnykh dvigatelej malyh tyag* [Planning and analysis of the results of tests of liquid rocket engines of small rods]. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya AVM № 2013615794, 2013.

© Коломенцев А. И., Хохлов А. Н., 2013

УДК 629.78.001.5

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ВРАЩАЮЩИМИСЯ АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ

Ц. Г. Надараиа¹, И. Я. Шестаков², А. А. Фадеев², К. В. Надараиа^{3,4}

¹ООО «КВОНТ»

Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 75

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
660014, Российская Федерация, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: yakovlevish@mail.ru

³Дальневосточный федеральный университет

690950, Российская Федерация, Владивосток, ул. Суханова, 8. E-mail: nadaraiaqv@mail.ru

⁴Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук

690022, Российская Федерация, Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159

Приведена классификация источников питания космического аппарата (КА), основные требования, предъявляемые к источникам питания КА и сравнительная оценка аккумуляторных батарей по удельной энергии. Показаны условия возникновения электростатических разрядов на поверхности КА и их характеристики. Рассматривается энергетическая установка, состоящая из вращающихся аккумуляторных батарей с использованием энергии электростатических зарядов для поддержания заданной частоты вращения. Представлены некоторые явления в проводниках второго рода, возникающие в поле центробежных сил. Приведена упрощенная оценка электрических и центробежных сил, действующих на ионы в электролите. Приведены результаты исследования опытного образца и рекомендации по практическому применению энергетической установки.

Ключевые слова: энергетическая установка космического аппарата, вращающиеся аккумуляторы, аккумуляторные батареи.

PROPULSION OF A SPACECRAFT WITH THE ROTATING BATTERIES

C. G. Nadaraia¹, I. Y. Chestakov², A. A. Fadejev², K. V. Nadaraia^{3,4}

¹“CVONT” LLC

75, Svobodniy Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: yakovlevish@mail.ru

³Far Easter Federal University

8, Sukhanova str., Vladivostok, 690950, Russian Federation. E-mail: nadaraiaqv@mail.ru

⁴Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

159, 100-letiya Vladivostoka Av., Vladivostok, 690022, Russian Federation

The classification of the sources of a power spacecraft, the main requirements to the power source AC and the comparative evaluation of the batteries for the specific energy are given. The conditions for the occurrence of electrostatic discharge on the surface of the spacecraft and their characteristics are shown. The energetic system consisting of rotating batteries using the energy of the electrostatic charges to maintain the desired speed is considered. There are some of the phenomena in the conductors of the second kind arising in the field of the centrifugal forces. A simplified assess-

ment of electrical and centrifugal forces acting on the ions in the electrolyte is shown. The results of the research of a prototype and recommendations on the practical application of the energy installation are given.

Keywords: power unit of the spacecraft, rotating batteries, rechargeable batteries.

Одной из важнейших бортовых систем любого космического аппарата (КА), прим. автора), которая, в первую очередь, определяет его тактико-технические характеристики, надежность, срок службы и экономическую эффективность, является система электрообеспечения. Поэтому проблемы разработки, исследования и создания систем электроснабжения КА имеют первостепенное значение.

От энергетической установки во многом зависит конструктивное исполнение КА: габаритные размеры, масса и срок активного существования на орбите. Выход из строя энергоустановки влечет за собой выход из строя всего аппарата.

Масса бортовой энергетической установки отечественных КА находится в пределах 8–25 % от массы объекта [1], поэтому снижение массы энергоустановки является актуальной проблемой.

В качестве первичных источников для питания бортовых систем КА используются различные генераторы энергии:

- 1) солнечные батареи;
- 2) химические источники тока, в частности:
 - аккумуляторы;
 - гальванические элементы;
 - топливные элементы;
- 3) радиоизотопные источники энергии;
 - ядерные реакторы.

В состав первичного источника входит не только генератор электроэнергии, но и обслуживающие его системы, например система ориентации солнечных батарей.

Основным источником электроэнергии для КА в настоящее время является комбинация солнечных и аккумуляторных батарей.

Солнечные батареи (СБ) выгодно применять для небольших потребляемых мощностей тока из-за большой площади их поверхности и высокого удельного веса. Для получения, например, мощности в 3 кВт требуется батарея, состоящая из 100 000 элементов с общим весом около 300 кг, т. е. при удельном весе в 100 кг/кВт, такие батареи займут площадь более 30 м².

Масса СБ определяется исходя из удельных параметров. В настоящее время удельная масса СБ составляет 2,77 кг/м² для кремниевых и 4,5 кг/м² для арсенид-галлиевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). СБ с кремниевыми монокристаллическими ФЭП по удельно-массовым характеристикам достигли своего физического предела.

КПД солнечных батарей невелик, он не превышает пока 11–13 %. Это значит, что с 1 м² современных солнечных батарей снимается мощность в 100–160 Вт.

В настоящее время на КА широко используются никель-водородные аккумуляторы, однако, энерго-массовые характеристики этих аккумуляторов достигли своего предела (70–80 Вт·ч/кг). Возможность

дальнейшего улучшения удельных характеристик никель-водородных аккумуляторных батарей весьма ограничены и требуют крупных финансовых затрат.

К аккумуляторным батареям (АБ), используемым на КА, предъявляются следующие требования:

- максимальное количество циклов «заряд–разряд»;
- стойкость к перезаряду;
- высокие удельные массогабаритные характеристики;
- широкий диапазон рабочих температур;
- возможность зарядки малыми токами;
- низкие токи саморазряда.

Важнейшей характеристикой химического аккумулятора является удельная энергия, так как она определяет массогабаритные параметры батареи. Другая важная характеристика – это надежность, так как резервирование химических аккумуляторов крайне нежелательно из-за их высокой массы. Используемые в космической технике аккумуляторы, как правило, имеют герметичное исполнение; герметичность обычно достигается с помощью металлокерамических уплотнений.

Помимо основной функции аккумуляторная батарея может играть роль стабилизатора напряжения бортовой сети, так как в рабочем диапазоне температур её напряжение меняется мало при изменении тока нагрузки.

В таблице представлено сравнение аккумуляторных батарей по удельной энергии [2]. Наилучший показатель у литий-полимерных АБ, однако такие батареи достаточно дороги.

Сравнение различных типов аккумуляторных батарей

Тип АБ	Удельная энергия АБ, Вт·ч/кг
Li-Polimer, литий-полимерная	90–150
Li-Ion, литий-ионная	90–150
Ag-Cd, серебряно-кадмиевая	50–60
Ni-H, никель-водородная	50–60
Ni-Cd, никель-кадмиевая	20–50
Свинцово-кислотная	15–40

При прохождении КА в космическом пространстве на него действуют потоки плазмы, электромагнитные излучения с разными длинами волн и многое другое, что составляет космическую среду. Под действием этих факторов КА приобретает некоторый электрический заряд и обусловленный им электрический потенциал относительно окружающей плазмы [3; 4].

Участки поверхности КА заряжаются неодинаково из-за различных условий воздействия внешних факторов на эти участки, из-за различий в электрофизических свойствах материалов. Типичным примером является приобретение неодинаковых зарядов осве-

щенным и неосвещенным участками поверхности КА в сильно разреженной космической плазме. Поскольку поверхность современных КА на 80–90 % покрыта диэлектрическими материалами (терморегулирующими покрытиями, защитными стеклами солнечных батарей и т. п.), потенциалы различным образом заряженных ее участков не могут выравниваться.

Электризация диэлектрических материалов КА может вызываться также электронами радиационного пояса Земли с характерными энергиями $\sim 1\text{--}10$ МэВ. Электроны с такими энергиями проникают в диэлектрик на глубину до 1 см, создавая внедренный электрический заряд. Это явление называется объемной электризацией КА, в отличие от рассмотренного выше случая поверхностной электризации, обусловленной воздействием на КА магнитосферной плазмы, частицы которой могут проникнуть в диэлектрик на глубину $\sim 10\text{--}20$ мкм.

Происходит так называемое дифференциальное заряджение, при котором между отдельными участками поверхности КА появляются электрические напряжения, вызывающие электростатические разряды (ЭСР).

Основные характеристики электрических разрядов на КА следующие [5]:

- разность потенциалов до 20 кВ;
- токи разрядов до 100 А;
- длительность фронта ЭСР $10^{-8} - 10^{-7}$;
- длительность ЭСР $10^{-7} - 10^{-6}$;
- энергия ЭСР до 0,2 Дж;
- частота разрядов до 10 Гц.

Импульсные токи, возникающие при ЭСР и протекающие в корпусе КА, кабельных сетях, проложенных на его поверхности, и в элементах аппаратуры, расположенных в специальных экранах или термоконтейнерах, представляют основную опасность для бесперебойного функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) КА. Кроме этого, опасность представляют импульсные электромагнитные поля, возникающие при протекании токов разряда. Проникая через неоднородности экранов, они воздействуют на непреднамеренные антенны внутри БРЭА, наводя помеховые токи и напряжения.

Разности потенциалов на поверхностях КА, находящихся на геостационарных орбитах, могут достигать 20 кВ, а средние значения энергии ЭСР составляют 6–200 мДж. В результате ЭСР по корпусу КА протекают импульсные токи амплитудой до 100 А. Они приводят к возникновению ЭМП в элементах кабельных систем БРЭА. ЭМП различной природы, вызванные ЭСР, приводят к кратковременным сбоям и отказам БРЭА, искажению информационных сигналов и сигналов управления, а в отдельных случаях – физическому повреждению бортовых устройств. Из-за высокой сложности реальных конструкций КА и их БРЭА задача определения места разряда и его уровня достаточно сложна и на сегодняшний день не отработана. Это затрудняет разработку методов, средств контроля и предотвращения ЭСР и, соответственно, защиты аппаратуры от его воздействия.

В данной работе предлагается использование электростатических зарядов для восстановления ки-

нетической энергии вращающихся масс путём накопления этих зарядов в ионисторах. Для этого в энергетической установке (рис. 1) аккумуляторные батареи 1 устанавливаются в секторы 2 на вращающемся корпусе 3. Корпус имеет форму диска и вращается относительно оси 4, на которой закреплены постоянные магниты 5. Коаксиально оси на корпусе расположены статорные обмотки 6, в которых наводится ЭДС, необходимая для подзарядки АБ. По периферии корпуса установлены кольца 7 из магнитных материалов (викалой, альнико и др.). Ось устройства находится в центре дискообразного основания 8, на боковой периферийной стенке 9 которого смонтированы статорные обмотки 10, на которые подается напряжение для раскрутки АБ перед стартом КА. Статорные обмотки 10 гальванически связаны с ионисторами (на рис. 1 не показаны). Вращающиеся части энергетической установки играют роль маховичного накопителя.

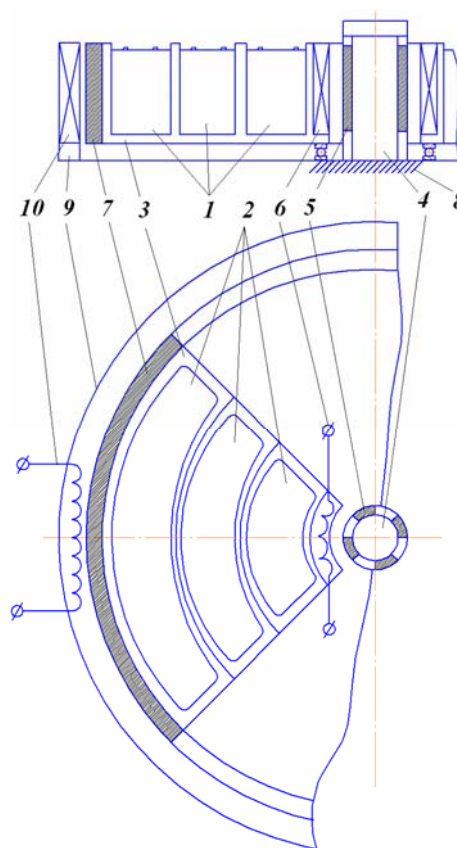


Рис. 1. Энергетическая установка с вращающимися АКБ

Гироскопический эффект, возникающий при вращении АБ, может быть использован для стабилизации КА, что сократит расход рабочего тела на работу двигателей стабилизации.

По мнению авторов [6–8] при вращении проводников второго рода (электролиты в АБ) возникает поляризация электролита и возникает разность потенциалов на электродах. Если разность потенциалов превысит напряжение разложения электролита, то начнется электролиз с выделением продуктов электрохимических реакций. Частоту вращения электро-

лита, при которой начинается поляризация, авторы патента [6] предлагают рассчитать по формуле

$$\omega \geq \sqrt{[q_a q_k (1 - \alpha T)] [16 \pi \epsilon_0 \Delta m \rho h K (R - 0,5h) (2r_B + r_{II})^2]},$$

где q_a , q_k – электрические заряды аниона и катиона электролита, Кл, в стехиометрическом соотношении; T – абсолютная температура раствора, К; Δm – разность масс гидратированных катиона и аниона, кг; ρ – линейная концентрация тяжелых ионов, м⁻¹; $\rho = 10^3 \sqrt{CN}$, где C – молярная концентрация раствора, моль·л⁻¹, N – число Авогадро, моль⁻¹; h – высота столба раствора, м; K – степень диссоциации электролита, 10⁻² %; R – внутренний радиус емкости, м; α – температурный коэффициент изменения энергии гидратной связи, К⁻¹; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф·м⁻¹; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость воды; r_B – эффективный радиус молекулы воды, м; r_{II} – эффективный радиус тяжелого иона, м.

Представленная выше математическая зависимость получена в результате эмпирических и теоретических исследований.

Вышеприведенное выражение может быть использовано в случае применения водных растворов. Тем не менее процесс поляризации при вращении будет происходить и в других электролитах, включая гелеобразные и твердые. Однако для получения математического выражения в случае использования неводных электролитов в АБ необходимы теоретические и экспериментальные исследования.

В результате поляризации возникает разность потенциалов между электродами. В статье [8] изложен расчет напряжения между анодом и катодом в аммиачном растворе при линейной скорости периферийного электрода 200 м/с. Снимаемое напряжение при этом может достигать 1 В. Данная методика расчета может быть применена только для аммиачных растворов щелочных металлов в связи с их специфическим поведением в жидком аммиаке, тем не менее, подход, используемый в этой работе, может быть использован для расчета других электрохимических систем.

При конструировании энергетической установки предлагается располагать анод и катод АБ так, чтобы электрическая сила, действующая на ионы, совпадала с силой центробежной. На рис. 2 и 3 показаны схемы расположения электродов аккумуляторов относительно центробежных сил. В литий-ионном и в литий-полимерном аккумуляторах носителем тока является ион лития, в кислотном – ионы водорода и сульфата. Ион сульфата тяжелее иона водорода, поэтому направление центробежной силы, действующей на ион сульфата должно совпадать с направлением электрической силы. Далее приведена оценка электрических и центробежных сил, действующих на ион, без учета релаксационного и электрофоретического эффектов.

Масса электрона $m_e = 0,91 \cdot 10^{-27}$ (г). Заряд электрона $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ (Кл). Тогда заряд иона лития $q_{Li^+} = +1,6 \cdot 10^{-19}$ (Кл).

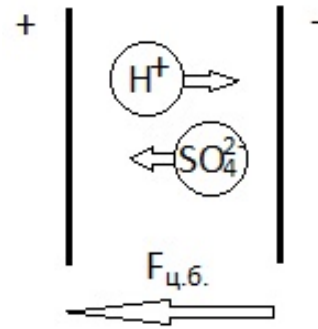


Рис. 2. Схема расположения электродов литий-ионного аккумулятора в поле центробежных сил

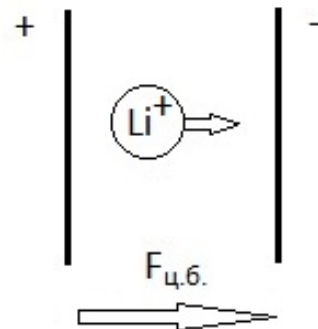


Рис. 3. Схема расположения электродов кислотного аккумулятора в поле центробежных сил

Напряженность электрического поля между электродами

$$E = \frac{U}{\delta} = \frac{F_{эл}}{q},$$

откуда $F_{эл}$ – сила, действующая на заряд

$$F_{эл} = Eq.$$

Масса атома лития

$$m_{Li} = \frac{M}{N_A} = \frac{6,941}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,156 \cdot 10^{-23} \text{ г.}$$

Напряжение на литиевых аккумуляторах $U = 3,6$ В, расстояние между электродами $\delta = 1$ (мм), тогда напряженность электрического поля будет равна

$$E = \frac{3,6}{1 \cdot 10^{-3}} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ В/м.}$$

Для никель-кадмиевого, никель-цинкового аккумуляторов напряженность электрического поля $E = 18 \cdot 10^3$ (В/м), $\delta = 2$ (мм) тогда электрическая сила определится:

$$F_{эл} = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,76 \cdot 10^{-16} \text{ Н.}$$

Центробежная сила определяется известным выражением:

$$F_{цб} = \frac{mV^2}{R} = m\omega^2 R.$$

Примем радиус вращающихся масс $R = 0,25$ м. При $n = 3000$ об/мин угловая скорость вращения составит $\omega = 314$ рад/с. Центробежная сила определится как

$$F_{цб} = 1,156 \cdot 10^{-23} \cdot 314^2 \cdot 0,25 = 0,28 \cdot 10^{-18} \text{ Н.}$$

Из расчетов видно, что центробежная сила при повышении числа оборотов приближается к значению электрической силы. С учётом электрофоретического эффекта электрическая сила, действующая на ион, будет меньше расчетной, а центробежная сила будет больше, поэтому следует ожидать, что эти силы будут соизмеримы. В связи с этим ориентацию электродов относительно центробежных сил необходимо учитывать при проектировании подобных энергетических установок.

Модель подобной конструкции была создана и испытана при числе оборотов 3 000 об./мин. При этом направление действия электрических и центробежных сил совпадало. Электрическое напряжение литий-ионных аккумуляторных батарей при испытаниях увеличилось на 2–5 %, целостность корпуса батарей не нарушалась. Использование кинетической энергии вращающихся АБ по ориентировочным расчётам позволит сократить массу бортовой энергетической установки на 5–7 % (за счет использования электростатического заряда, образующегося на поверхности КА, а также за счет уменьшения габаритно-массовых характеристик солнечных батарей).

Данное устройство может быть использовано в режиме резервного источника энергии при повреждении солнечных батарей от космического мусора и других аномалий.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Размещение АБ на вращающейся платформе позволит использовать кинетическую энергию массы.
2. Для восполнения кинетической энергии вращающейся массы перспективно применение электростатического электричества, образующегося на КА, тем самым отпадает необходимость в антистатической защите.
3. Расчеты показывают, что электрические и центробежные силы, действующие на ионы в электролите, соизмеримы, поэтому при конструировании энергетической установки АБ нужно располагать так, чтобы направления действия вышеназванных сил совпадали.
4. Под действием центробежных сил в электролите происходит поляризация, что позволит пополнять запасы электрической энергии на борту КА.
5. Ориентировочный расчет показывает, что использование кинетической энергии вращающихся АБ позволит уменьшить массу энергетической установки КА на 5–7 % без учёта поляризации.
6. Испытания экспериментального образца с литий-ионными аккумуляторами в лабораторных условиях подтвердили правильность расчётов и предположений.

Библиографические ссылки

1. Гущин В. Н. Основы устройства космических аппаратов. М. : Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Химические источники тока : справочник / под ред. Н. В. Коровина и А. М. Скундина. М. : МЭИ. 2003. 740 с.
3. Акишин А. И., Новиков Л. С. Электризация космических аппаратов // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Космонавтика, астрономия. № 3. М. : Знание. 1985. 73 с.

4. Электризация космических аппаратов в магнитосферной плазме / Л. С. Новиков, В. Н. Милеев, К. К. Крупников, А. А. Маклецов. В кн.: Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л. С. Новикова. М. : КДУ, 2007. С. 236–275.

5. Дорофеев Р. Ю. Особенности моделирования процессов электризации КА в орбитальных условиях эксплуатации // Электромагнитные поля и электронные системы. 2012. Т. 17, № 5. С. 20–24.

6. Пат. РФ № 2174162. Устройство для преобразования энергии / Г. И. Кудимов, В. В. Студенников. Опубл. 27.09.2001.

7. Кудимов Г. И., Студенников В. В. Водородная энергетика: этап практических решений : сб. статей. М. : МИС-РТ, 1999. № 18-1. С. 1–18.

8. Макаров А. Ф. Хемозлектрический гравитолит В. В. Студенникова как возможность прямого преобразования тепловой энергии в электричество [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7494.html> (дата обращения: 01.10.2013).

References

1. Gushin V. N. *Osnovi ustroystva kosmicheskikh apparatov* (The basic structure of spacecraft). Moscow, Machine building, 2003, 272 p.
2. Korovina N. V., Skundina A. M. *Himicheskie istochniki toka* (Chemical sources of a current). Moscow, MPEI, 2003, 740 p.
3. Akichin A. I., Novikov L. S. [Electrification of spacecraft]. *Novoye v zhizni, nauke, tekhnike. Ser. Kosmonavtika, astronomia* [New in Life, Science, Technology. Series aerospace, electronics]. Moscow, Znanie, 1985, no. 3, 73 p.
4. Novikov L. S., Mileev V. N., Krupnikov K. K., Maklecev A. A. [Electrification of spacecraft in the magnetospheric plasma]. *Model' kosmosa. T. 2. Vozdeystviye kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovaniye kosmicheskikh apparatov* [Model of space. Vol. 2. Effects of the space environment on materials and equipment for spacecraft]. Moscow, KDU, 2007, p. 236–275.
5. Dorofeev R. U. *Electromagnitnie polya i elektronnie sistemi*, no. 5 (17), 2012, p. 20–24.
6. Kudimov G. I., Studennikov V. V. *Ustroystvo dlya preobrazovaniya energii* [Device for transformation of energy]. Patent RF, no. 2174162, 2001.
7. Kudimov G. I., Studennikov V. V. *Vodorodnaya energetika: etap prakticheskikh pecheniy* (Hydrogen energy: the stage of practical solutions), Moscow, MIS-RT, 1999, p. 1–18.
8. Makarov A. F. *Khemoelektricheskiy gravitoliz V. V. Studennikova kak vozmozhnost' pryamogo preobrazovaniya teplovooy energii v elektrichestvo* (Chemo electric gravitoliz for V. V. Studennikova – as the possibility of direct conversion of thermal energy into electricity). Available at: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7494.html> (accessed 1 October 2013).

© Надараица Ц. Г., Шестаков И. Я.,
Фадеев А. А., Надараица К. В., 2013

УДК 621.316

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ СПУТНИКОВОЙ СТАНЦИИ*

А. С. Сидоров, Н. Н. Горяшин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sidorovalex83@gmail.com

Рассмотрена разработка и моделирование системы электропитания (СЭП) автономной наземной спутниковой станции для дистанционного мониторинга параметров окружающей среды и состояния технических объектов. Предложена новая структура системы электропитания автономной наземной спутниковой станции, где первичным источником электроэнергии является солнечная батарея на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей, а накопительным источником электроэнергии – суперконденсаторы с повышенным ресурсом работы и крайне низкой зависимостью характеристик от параметров окружающей среды. Были выработаны требования к мощности солнечной батареи, энергии, запасаемой суперконденсаторами, их количеству исходя из средней мощности нагрузки, параметров окружающей среды, длительности темного и светлого времени суток. Была разработана модель СЭП в формате P-Spice. Проведено ее моделирование в пакете MicroCAP 7.1. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной СЭП.

Ключевые слова: спутниковая станция, система электропитания, солнечная батарея, суперконденсатор.

POWER SUPPLY SYSTEM FOR STANDALONE SATELLITE COMMUNICATION TERMINAL

A. S. Sidorov, N. N. Goryashin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: sidorovalex83@gmail.com

This paper covers developing and modeling of a power supply system of a standalone satellite communication terminal for remote monitoring of environmental conditions and manmade objects state. A new structure of a power supply system of a standalone satellite communication terminal where Si solar array is used as a primary power source and supercapacitors with high lifetime and low value thermal characteristics are used as a reservoir power source, is proposed. Expressions allowing calculating minimal solar array power, energy stored in supercapacitors, their quantity in dependence of average load power, environmental conditions, daytime and nighttime duration, are proposed. A P-SPICE model of the proposed power supply system was developed. This model was simulated in MicroCAP 7.1. The simulation results confirmed operability of the proposed power supply system.

Keywords: satellite communication terminal, power supply system, solar array, supercapacitor.

В настоящее время одним из актуальных направлений в разработке сети наземных спутниковых станций являются автономные наземные спутниковые станции (АНСС), которые в труднодоступных и удаленных районах Земли, например с помощью многофункциональной системы персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов (КА) на низких орбитах «Гонец-Д1М» [1], могут выполнять ряд значимых задач, таких как дистанционный мониторинг работы газопроводов, сбор метеорологических данных, контроль сейсмоактивности и т. д. Одной из важнейших подсистем в данных терминалах является система электропитания, которая должна обеспечивать непрерывную работу терминала в любое время суток при любых погодных условиях.

Общая структура СЭП АНСС представлена на рис. 1. Первичный источник энергии (ПИЭ) предназначен

для питания нагрузки и заряда накопительного источника энергии (НИЭ). НИЭ предназначен для питания нагрузки в то время, когда ПИЭ не вырабатывает энергию. ЭПУ предназначено для согласования уровней напряжения ПИЭ, НИЭ и нагрузки и осуществления заряда/разряда НИЭ. Схема управления (СУ) управляет потоками энергии между источниками и нагрузкой и собирает телеметрическую информацию.

Особенностью работы АНСС на территории России является широкий диапазон изменения параметров окружающей среды, таких как температура, плотность потока солнечного излучения, продолжительность дня, что требует надлежащего выбора первичного и вторичного источника электроэнергии и структуры системы электропитания, которая позволит наилучшим образом управлять и использовать доступную энергию.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.7189.2013, и Германской службы академических обменов (DAAD).

Из всех видов ПИЭ, таких как солнечные батареи (СБ), ветрогенераторы, погружные ГЭС и т. д., наиболее подходят к применению в СЭП АНСС солнечные батареи. В настоящее время в СБ для наземного применения в качестве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) используются недорогие ФЭП на основе кремния с КПД около 15 %.

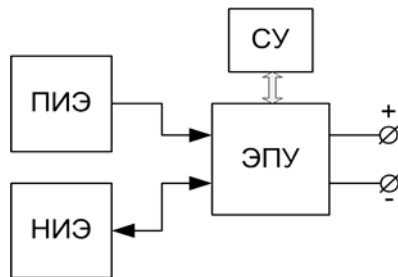


Рис. 1. Общая структура СЭП АНСС:
ПИЭ – первичный источник энергии;
НИЭ – накопительный источник энергии;
ЭПУ – энергопреобразующее устройство;
СУ – схема управления

Долгое время в качестве НИЭ использовались аккумуляторные батареи (АБ) разных типов: никель-кадмиевые АБ (NiCD), никель-метал-гидридные (NiMH), на основе лития (литий-ионные Li-Ion или литий-полимерные Li-Pol) и свинцовые АБ. Свинцовые и NiCD АБ обладают низкими удельными характеристиками. К тому же NiCD АБ обладают эффектом «памяти», что требует полного цикла «заряд–разряд». Li-Ion (Li-Pol) и NiMH обладают лучшими удельными характеристиками, причем Li-Ion (Li-Pol) более эффективны, чем NiMH и NiCD, так как имеют больший срок службы, меньший ток саморазряда и количество циклов заряда–разряда не зависит от глубины разряда. Однако у Li-Ion (Li-Pol) срок службы зависит от зарядного тока, данные АБ необходимо заряжать по определенному алгоритму. Также у всех АБ ограничен диапазон рабочих температур, что ограничивает их применение в климатических условиях России (при изменении температуры от -35 до $+35$ °C, например). Поэтому использование этих АБ нецелесообразно для АНСС при длительном сроке службы в суровых климатических условиях.

Перспективным НИЭ являются суперконденсаторы (СК), неоспоримыми достоинствами которых является то, что их емкость изменяется не более чем на 10 % при изменении температуры в диапазоне $-40 \dots +60$ °C, в разы большие токи заряда/разряда, количество циклов/разряда больше 500 000. Недостатками являются худшие удельные характеристики, повышенный ток саморазряда при пассивном выравнивании между конденсаторами в составе конденсаторной сборки, более высокая стоимость. Однако исходя из условия надежной работы в суровых климатических условиях СК имеют преимущества перед АБ. Поэтому в данном проекте в качестве ПИЭ рассматриваются СБ на основе кремниевых ФЭП производства ОАО «НПП «Квант» [2], а в качестве НИЭ – суперконденсаторы производства компании Maxwell Technologies [3].

В течение последних нескольких лет наблюдается повышение интереса к АНСС. В ряде публикаций [4–7] предлагаются структуры СЭП АНСС. В качестве ПИЭ во всех решениях используется СБ. В качестве НИЭ используются АБ различных типов и(или) СК.

Самая простая структура СЭП АНСС представлена на рис. 2, а, где СБ подключается к АБ через блокирующий диод, а преобразователь напряжения стабилизирует напряжение выходной шины СЭП. Также вместо АБ можно использовать СК (рис. 2, б). Достоинствами данной структуры являются простота и низкая стоимость. Недостатками являются:

1. Заряд АБ (СК) может происходить тогда, когда напряжение на выходе СБ больше напряжения на АБ (СК) плюс падение напряжения на блокирующем диоде.
2. Ток заряда будет уменьшаться по мере заряда АБ (СК), что снижает скорость заряда НИЭ.
3. Система работает не в оптимальном режиме, т. е. невозможно извлечь из СБ всю доступную мощность.

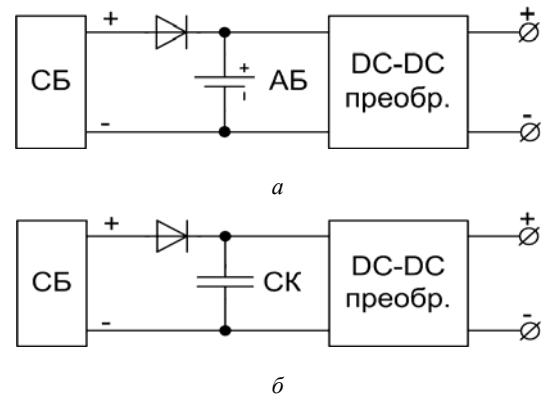


Рис. 2. Структуры СЭП АНСС:
DC-DC преобр. – импульсный преобразователь напряжения

В [4–6] для повышения эффективности вместо диода используется еще один DC-DC-преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ (на основе инвертирующего преобразователя), что, с одной стороны, усложняет систему, с другой – повышает ее эффективность, так как от СБ всегда забирается максимальная мощность (рис. 3). Однако возникает проблема с контролем заряда АБ (СК). При изменении параметров ВАХ СБ и длительности дневного времени суток, напряжение на АБ и СК не должно превышать максимально допустимого. Так как DC-DC-преобразователь с экстремальным отбором мощности питает еще преобразователь для нагрузки, то необходимо отключение АБ и СК от выходной шины преобразователя DC-DC экстрем. При этом при последующем подключении СК к шине могут происходить броски тока вследствие заряда емкостей DC-DC-преобразователя и нагрузки, что может привести к выходу из строя ключей и снижает срок службы АБ (СК). Поэтому данная структура имеет ограничение при работе при изменяющихся параметрах окружающей среды.

В [7] для повышения надежности и живучести предлагается структура, в которой используется два накопителя энергии – АБ и СК (рис. 4). Однако в суровых климатических условиях использование АБ становится крайне неэффективным.

Таким образом, имеющиеся структуры СЭП не подходят для использования в АНСС в климатических условиях России. На рис. 5 представлена новая структура СЭП. Отличием новой структуры СЭП от имеющихся является то, что питание нагрузки (Н) и заряд/разряд СК осуществляют разные преобразователи. При этом управление состоянием СК осуществляется за счет непосредственного управления сигналом ШИМ преобразователей. Номинальное выходное напряжение СЭП +12 В (напряжение питания терминалов системы «Гонец-Д1М» [1]), максимальное напряжение СК – +16 В (суперконденсатор BMOD0500 B01 емкостью 500 Ф, запасаемой энергией 17,8 Вт·ч, током саморазряда 5,2 мА [3]).

Преобр. СБ-Н предназначен для питания нагрузки стабильным напряжением +12 В от солнечной батареи. Строится данный преобразователь на основе преобразователя понижающего типа.

Преобразователь СБ-СК является зарядным устройством, работающим по алгоритму максимального отбора мощности от СБ (шаговая экстремальная система). С учетом того, что часть мощности СБ забирает преобразователь СБ-Н, преобразователь СБ-СК забирает разницу между максимальной мощностью СБ и мощностью, потребляемой преобразователем СБ-Н. Строится данный преобразователь на основе полумостового преобразователя, где СК является частью выходного фильтра.

Преобразователь СК-Н предназначен для питания нагрузки от СК при отсутствии энергии от СБ. Строится данный преобразователь на основе инвертирующего преобразователя, так как по мере разряда СК его напряжение уменьшается. Граничным коэффициентом заполнения инвертирующего преобразователя, при котором сохраняется приемлемый КПД, является 0,75 [8], поэтому при выходном напряжении 12 В, СК

должен разряжаться до остаточного напряжения $U_{ост} = 4$ В. Также данное остаточное напряжение необходимо для работы системы управления СЭП.

Преобразователи СБ-Н и СК-Н имеют общую обратную связь, но разные опорные напряжения. Преобразователь СБ-Н стабилизирует напряжение 12,2 В, а преобразователь СК-Н – 11,8 В. Таким образом, между двумя преобразователями происходит автоматическое переключение при появлении энергии от солнца и при наступлении темного времени суток.

Алгоритм работы системы электропитания следующий:

1. На первом этапе, когда СК разряжен и от СБ энергия не поступает, СЭП находится в выключенном состоянии. Система управления СЭП также не работает, и выход СЭП отключен.

2. При появлении энергии от солнечной батареи включается система управления СЭП и происходит запуск преобразователя СБ-СК, отвечающего за заряд СК. Преобразователи СБ-Н и СК-Н находятся в выключенном состоянии. Происходит заряд СК до его максимального напряжения.

3. При достижении напряжения на СК максимального значения система управления СЭП отключает преобразователь СБ-СК. При наличии энергии от СБ система управления СЭП сначала включает преобразователь СБ-Н, а затем преобразователь СК-Н. При отсутствии энергии от СБ система управления СЭП сначала включает преобразователь СК-Н, а затем преобразователь СБ-Н. После этого подключается к выходу СЭП полезная нагрузка.

4. При снижении напряжения на конденсаторе на величину напряжения саморазряда за сутки и наличии энергии от СБ, включается преобразователь СБ-СК, при этом преобразователь СК-Н при появлении энергии от солнца не потребляет никакой энергии от СК.

5. При снижении напряжения на СК до некоторого остаточного напряжения $U_{ост}$ система управления СЭП отключает нагрузку от выхода СЭП.

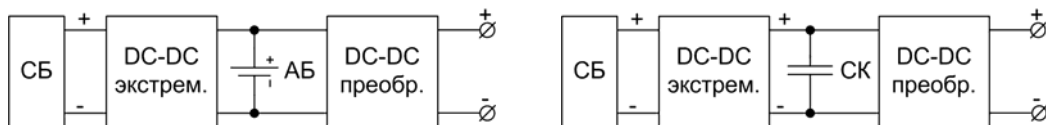


Рис. 3. Структуры СЭП АНСС: DC-DC экстрем. – импульсный преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ; DC-DC преобр. – импульсный преобразователь напряжения

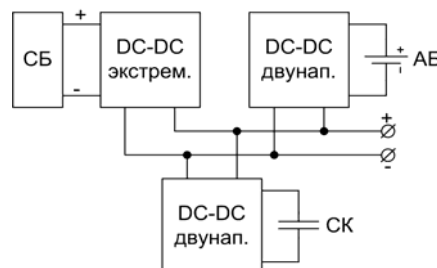


Рис. 4. Структура СЭП АНСС:

DC-DC экстрем. – импульсный преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ; DC-DC двунап. – двунаправленный импульсный преобразователь напряжения

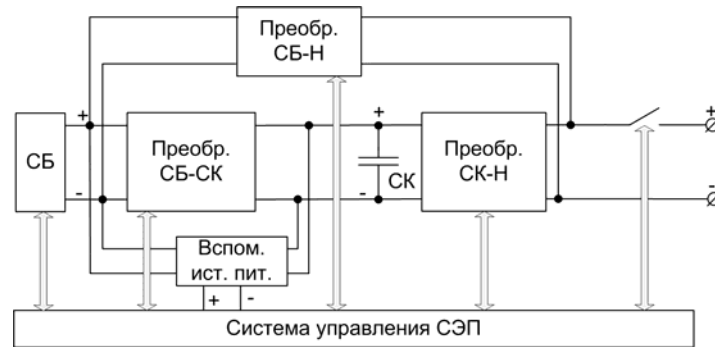


Рис. 5. Новая структура СЭП:
СБ – солнечная батарея; СК – суперконденсатор; Н – нагрузка

Для бесперебойной работы СЭП АНСС необходим правильный расчет мощности СБ $P_{СБ}$ и энергии, запаасаемой СК, $W_{СК}$. Определение требований к СБ и СК производится на основе решения уравнения энергобаланса, т. е. равенства мощности, поступающей от СБ, и потребляемой нагрузкой и СК. Естественно, что расчет $P_{СБ}$ и $W_{СК}$ происходит для того дня в году, когда длительность темного времени суток имеет наибольшее значение.

В темное время суток, когда $P_{СБ} = 0$, нагрузка работает за счет энергии, отдаваемой СК. Необходимую энергию суперконденсатора можно определить из следующего выражения

$$W_{СК} = \frac{P_H}{\eta_{ру}} \tau_H, \quad (1)$$

где P_H – средняя мощность нагрузки за один час, Вт; $\eta_{ру}$ – КПД разрядного устройства (преобразователя СК-Н); τ_H – длительность темного времени суток, ч, $W_{СК}$ – энергия СК, Вт·ч.

Для определения количества параллельно включенных СК необходимо учесть следующие параметры:

- 1) ток саморазряда одного СК;
- 2) уменьшение емкости при изменении температуры (наихудший случай) – коэффициент $n_{кт}$;
- 3) уменьшение емкости за счет старения – коэффициент $n_{ст}$;
- 4) остаточное напряжение $U_{ост} = 4$ В.

За время τ_H при разряде током саморазряда $i_{ср}$ напряжение на суперконденсаторе уменьшится на величину $\Delta u_{СК}$, которую можно определить из следующего выражения

$$\Delta u_{СК} = \frac{3600 \tau_H i_{ср}}{C_{СК}},$$

где $C_{СК}$ – емкость СК, выраженная в Ф.

При этом уменьшение энергии СК $\Delta W_{СК}$, выраженной в Вт·ч, можно рассчитать по выражению

$$\Delta W_{СК} = \frac{C_{СК} \Delta u_{СК}^2}{7200}.$$

При остаточном напряжении $U_{ост} = 4$ В остаточную энергию СК $W_{ост}$ можно рассчитать по следующему выражению:

$$W_{ост} = 2,22 \cdot 10^{-3} C_{СК}.$$

Таким образом, зная энергию одного суперконденсатора $W_{СК1}$, коэффициенты $n_{кт}$ и $n_{ст}$, потери энергии на саморазряд $\Delta W_{СК}$, остаточную энергию $W_{ост}$, необходимую энергию параллельно включенных суперконденсаторов $W_{СК}$, можно рассчитать количество параллельно включенных СК

$$n = \frac{W_{СК}}{n_{СК1} n_{ст} W_{СК1} - \Delta W_{СК} - W_{ост}}.$$

В светлое время суток, когда $P_{СБ} > 0$, энергия, вырабатываемая СБ, поступает в нагрузку и на заряд СК. Так как в предложенной СЭП при заряде СК происходит максимальный отбор мощности от СБ, то величина $P_{СБ}$ будет характеризовать максимальную мощность СБ. Определить данную мощность можно из следующего выражения

$$P_{СБ} = \frac{\frac{W_{СК}}{n_{зу} \tau_d} + P_H}{n_{СН}}, \quad (2)$$

где P_H – средняя мощность нагрузки, Вт; $n_{зу}$ – КПД зарядного устройства (преобразователя СБ-СК); $n_{СН}$ – КПД преобразователя СБ-Н; $\tau_d = 24 - \tau_H$ – длительность светлого времени суток, ч; $W_{СК}$ – энергия СК, Вт·ч, рассчитанная по (1).

Полученное значение мощности СБ является минимально возможным. Для точного расчета площади СБ необходимо учитывать ряд факторов окружающей среды места установки АНСС, таких как диапазон изменения температуры окружающей среды; дневные, месячные и годовые нормы суммарной солнечной радиации; угол наклона панели СБ. Также необходимо учитывать то, что для правильной работы СЭП оптимальное напряжение СБ не должно быть меньше 14 В. Примеры расчета СБ для наземного применения приведены в [9].

Например, при $P_H = 12$ Вт, $\tau_H = 16$ ч, КПД всех преобразователей 90 % получим, что необходимо 19 СК типа BMOD0500 B01, а мощность СБ должна быть не меньше 47 Вт.

Для подтверждения работоспособности предложенной СЭП была разработана имитационная модель в формате P-Spice в пакете моделирования MicroCAP 7.1. В качестве примера средняя мощность нагрузки была выбрана 12 Вт, в качестве СБ была взята СБ КСМ-90 производства ОАО «НПП «Квант» [2].

В целях упрощения процесса моделирования модель СЭП разбита на две модели:

- модель системы в режиме заряда СК и при питании нагрузки от СБ;
- модель системы в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ.

На рис. 6 представлены результаты моделирования при работе системы в режиме питания нагрузки и заряда СК от СБ. В процессе моделирования были получены следующие результаты:

1. Среднее напряжение на СБ составляет 18,68 В при оптимальном напряжении (напряжении в точке максимальной мощности) 17,92 В, размах поискового сигнала составляет 0,2 В. Средний ток СБ составляет 5,13 А при оптимальном токе 5,38 А, размах поискового сигнала составляет 0,12 А. Таким образом, из-за наличия статической ошибки система работает в окрестности точки максимальной мощности (абсолютная разница между мощностями составляет 6 Вт).

2. Напряжение на нагрузке составляет 11,9 В, размах пульсаций 20 мВ.

3. Происходит заряд СК до необходимого напряжения 16 В.

4. Таким образом, в режиме заряда СК и при питании нагрузки от СБ предложенная СЭП отвечает предъявляемым требованиям.

На рис. 7 представлены результаты моделирования при работе системы в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ. При входе СБ в тень или наступлении ночного времени суток напряжение на выходе СЭП имеет просадку до 9,2 В относительно номинального напряжения 12 В, при выходе из тени или наступлении светлого времени суток напряжение на выходе СЭП имеет выброс до 14 В относительно номинального напряжения 12 В. Длительность отклонения напряжения составляет около 30 мс. Размах пульсаций составляет 500 мВ. Следует отметить, что главной задачей моделирования являлось подтверждение работоспособности предложенной СЭП, а не обеспечение наилучших показателей качества. Задача улучшения показателей качества переходного процесса должна решаться на этапе разработки опытного образца за счет, например, использования двухконтурного управления (обратная связь по среднему току дросселя) и т. д.

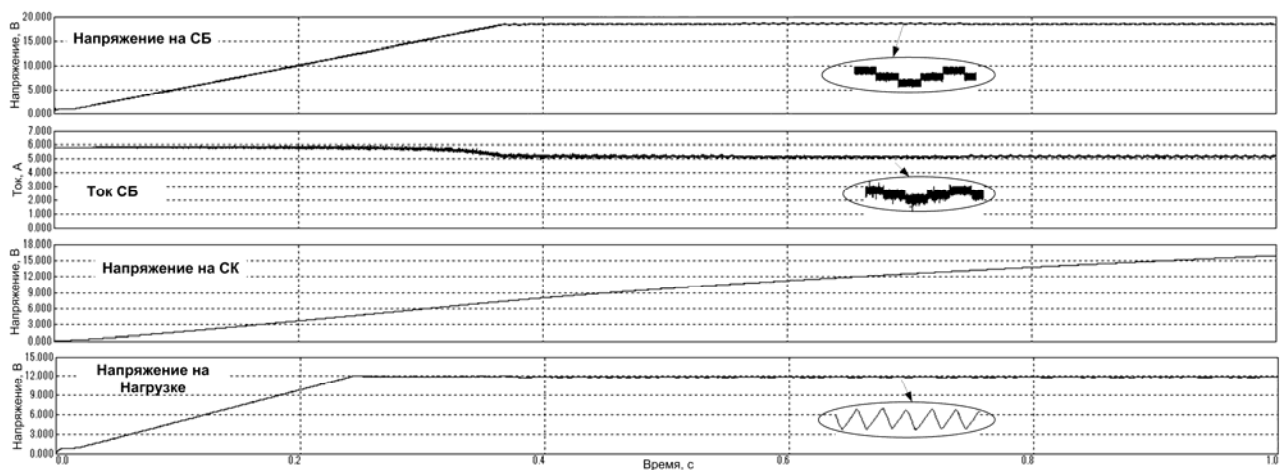


Рис. 6. Переходные процессы в СЭП при питании нагрузки и заряде СК от СБ

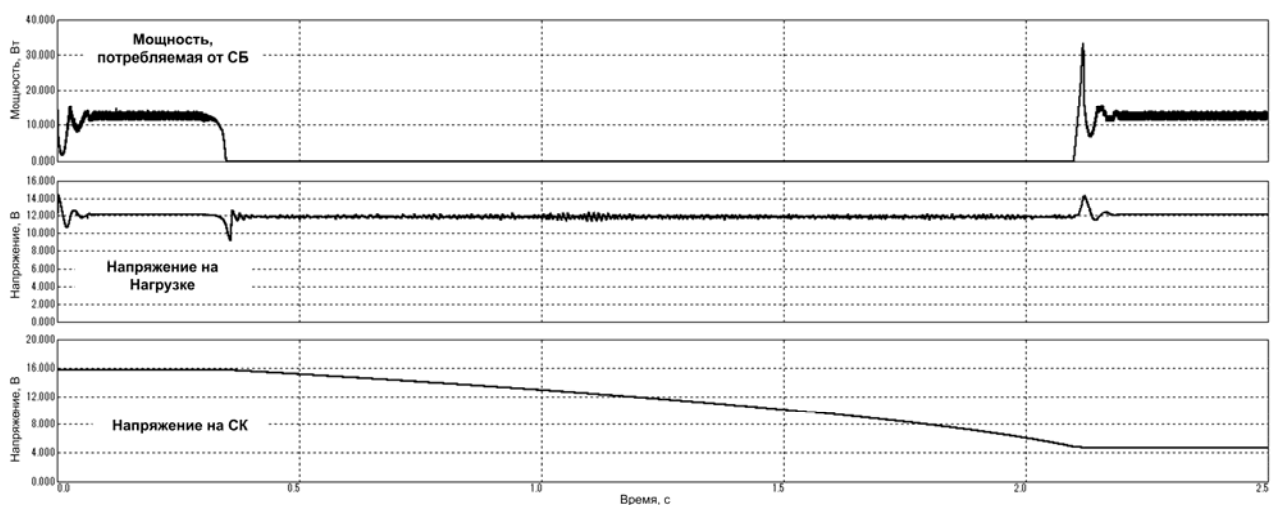


Рис. 7. Переходные процессы в СЭП в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ

Таким образом, в данной работе была предложена новая структура СЭП без использования аккумуляторных батарей, где накопительным источником электроэнергии являются суперконденсаторы с повышенным ресурсом работы. Выработаны требования к мощности солнечной батареи, энергии, запасаемой суперконденсаторами, и их количеству, исходя из средней мощности нагрузки, параметров окружающей среды, длительности темного и светлого времени суток. Была разработана модель СЭП в формате P-Spice. Проведено ее моделирование в пакете MicroCAP 7.1. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной СЭП.

Библиографические ссылки

1. Спутниковая система «Гонец» [Электронный ресурс]. URL: <http://gonets.ru/>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
2. ОАО «НПП «Квант» : офиц. сайт. URL: <http://www.npp-kvant.ru/>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
3. Maxwell Technologies : офиц. сайт. URL: <http://maxwell.com>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
4. Liu K., Kakaran J. Design of a solar powered battery charger // *Proceedings of IEEE Electron Power Energy Conference*, 2009. P. 1–5.
5. Raghunathan V., Kasal A., Hsu J., Friedman J., Srivastava M. Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded system // *Proceedings of IEEE International Conference Information Process Sensor Networks*, 2005. P. 457–462.
6. Brunelli D., Moser C., Thiele L., Benini L. Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems // *IEEE Transactions on Circuits Systems*. 2009. Vol. 56, no. 11. P. 2519–2528.
7. Ongaro F., Saggini S., Mattavelli P. Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27, no. 9. P. 3944–3951.
8. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М. : Солон-Р, 2002. 512 с.
9. Солнечная энергетика : пособие для вузов / под ред. В. И. Виссарионова. М. : Изд. дом МЭИ, 2008. 317 с.

References

1. *Sputnikovaya sistema Gonets* [Gonets LEOSat System]. Available at: <http://gonets.ru/> (accessed 16 September 2013).
2. *OAO "NPP "Kvant"* [JSC "NPP "KVANT"]. Available at: <http://www.npp-kvant.ru/> (accessed 16 September 2013).
3. Maxwell Technologies. Available at: <http://maxwell.com> (accessed 16 September 2013).
4. Liu K., Kakaran J. "Design of a solar powered battery charger", *Proceedings of IEEE Electron Power Energy Conference*, 2009, p. 1–5.
5. Raghunathan V., Kasal A., Hsu J., Friedman J., Srivastava M. "Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded system", *Proceedings of IEEE International Conference Information Process Sensor Networks*, 2005, p. 457–462.
6. Brunelli D., Moser C., Thiele L., Benini L. "Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems", *IEEE Transactions on Circuits Systems*, 2009, vol. 56, no. 11, p. 2519–2528.
7. Ongaro F., Saggini S., Mattavelli P. "Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012. Vol. 27, No. 9. PP. 3944-3951.
8. D'yakonov V. P., Maksimchuk A. A., Remnev A. M., Smerdov V. Yu. *Entsiklopediya ustroystv na polevykh tranzistorakh* (Encyclopedia devices FET). Moscow, SO-LON-R, 2002, 512 p.
9. *Solnechnaya energetika. Posobie dlya vuzov* (Solar Energy: A Guide for Universities), under. Ed. VI Vissarionova. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 317 p.

© Сидоров А. С., Горяшин Н. Н., 2013

УДК 629.78.054

ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. Е. Синицкий¹, А. В. Мурыгин²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: Dimasik77@yandex.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: avm514@mail.ru

Рассматриваются основные принципы построения стенда измерения динамических моментов управляющего двигателя-маховика. Описан принцип работы управляющего двигателя-маховика. Проведен анализ существующих стендов измерения момента двигателя-маховика. Приведено описание конструктивной, функциональной схем разработанного измерительного блока стенда, его принцип действия. Получены характеристические уравнения элементов измерительного блока. Определена структурная схема измерительного блока и рассчитаны ее основные параметры. Приведено описание моментного двигателя, датчика угла, упруговязкой опоры. В результате разработан динамический стенд, позволяющий производить измерения динамического момента одновременно с четырех двигателей-маховиков в диапазоне $\pm 0,9$ Нм, с точностью не менее 10^{-4} Нм. Динамический стенд способен измерять момент непосредственно от двигателя-маховика, что обеспечивает более точную имитацию углового движения КА в замкнутом контуре испытаний системы ориентации и стабилизации КА.

Ключевые слова: космический аппарат, двигатель-маховик, динамический момент, силовая компенсация.

THE QUESTIONS OF TECHNICAL REALIZATION OF THE DYNAMIC BENCH FOR THE RESEARCH OF THE ACTIVITY OF THE ENGINE-FLYWHEEL OF THE ATTITUDE CONTROL SYSTEM AND SPACE VEHICLE STABILIZATION

D. E. Sinitskiy¹, A. V. Murigin²

¹JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jelesnogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: Dimasik77@yandex.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: avm514@mail.ru

The main principles of the construction of a bench of measurement of the dynamic moments of the managing director-engine-flywheel are considered. The principle of activity of the control engine-flywheel is described. The analysis of existing benches of measurement of the moment of the engine-flywheel is carried out. The description of constructive, functional schemes of the developed measuring unit of a bench, its principle of action is resulted. The characteristic equations of elements of the measuring unit are received. The block diagramme of the measuring unit is determined and its key parametres are calculated. The description of the sensor of the moment, the sensor of a corner, an elastic-viscous support is resulted. The dynamic bench is as a result developed, allowing to make measurements of the dynamic moment simultaneously from four engines-flywheels in the Nanometer range, with accuracy not less than Nanometer. The dynamic bench is capable to measure the moment directly from the engine-flywheel that supplies more exact imitation of angular motion of space vehicle in a closed loop of tests of an attitude control system and space vehicle stabilization.

Keywords: space vehicle, engine-flywheel, dynamic moment, power indemnification.

Система ориентации и стабилизации (СОС) современных космических аппаратов (КА) является сложной системой, состоящей из высокоточных приборов определения углового положения, измерения угловых скоростей КА и исполнительных устройств, меняющих пространственное положение КА. В качестве

исполнительного устройства системы ориентации и стабилизации, для создания динамических управляющих моментов по трем осям связанной с КА системой координат используются двигатели-маховики. Двигатели-маховики выполнены на основе управляемого моментного бесконтактного двигателя постоян-

ного тока. Функции маховой массы выполняет ротор с постоянными магнитами, расположенными на максимально возможном диаметре, в двигателях-маховиках максимально снижены тормозные моменты. Электродвигатель обеспечивает реверсивное вращение ротора-маховика, его торможение, а величина создаваемого им вращающего (управляющего) момента при этом может плавно меняться в заданном диапазоне в соответствии с сигналом управления, подаваемым на вход двигателя-маховика [1].

Для всестороннего анализа работы двигателя-маховика при наземных испытаниях необходимы испытательные стенды, на которых можно исследовать динамические и точностные параметры двигателя-маховика во всех режимах его работы.

В настоящее время для измерения динамического момента двигателя-маховика обычно применяют динамический стенд измерения момента ИМ-15, разработанный в НПП «Полус» [2], в котором момент вычисляется по косвенным признакам – электрическим параметрам блока электроники. Измерительная схема имеет недостаточную точность для испытаний современных приборов [3]. Другой недостаток стенда ИМ-15 заключается в том, что он не позволяет измерять динамический момент от нескольких двигателей-маховиков одновременно.

Имеются данные о применении за рубежом стенда, построенного на базе газового сферического подшипника [4]. Его использование имеет ряд ограничений, таких как сложности настройки, балансировки, управления.

Для решения этих проблем в ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева» разработан динамический стенд для испытания двигателей-маховиков КА. Стенд имеет следующие технические возможности:

- диапазон измеряемого динамического момента $\pm 0,5$ Нм;

- погрешность измерения момента в диапазоне $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ Нм не более 10^{-4} Нм. Относительная погрешность измерения момента в диапазоне от $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ Нм до 0,5 Нм не более 0,5 %;

- в состав стенда входят четыре одинаковых, конструктивно разделенных измерительных блока; каждый блок позволяет измерять момент одного двигателя-маховика;

На рис. 1 представлена конструктивная схема измерительного блока.

Измерительный блок состоит из соединенных между собой упругой опоры 2, моментного двигателя 3, датчика угла поворота 1. Двигатель-маховик 8 установлен с помощью кронштейна 4 на измерительную балку 5, прикрепленную к упругой опоре.

На рис. 2 показана функциональная схема измерительного блока.

Пунктирной линией выделены части, входящие в блок электроники (БЭ). Вход блока электроники соединен с выходом усилителя-преобразователя (УП), размещенного в непосредственной близости к датчику угла. УП предназначен для усиления сигнала дат-

чика угла (ДУ) и включает в себя усилитель переменного тока и демодулятор, так как датчик переменного тока, а корректирующие цепи и МД работают на постоянном токе. Также УП имеет возможность регулировки коэффициента передачи K_1 . УП имеет два выхода, один выход которого соединен с дифференциатором (Диф). Дифференциатор используется для демпфирования системы, за счет коррекции частотной характеристики. Выход дифференциатора соединен с первым усилителем мощности (У1), предназначенного для усиления сигнала U_1 канала демпфирования, а также частотной коррекции системы силовой компенсации. У1 имеет защиту от перепада напряжения, а также возможность регулировки коэффициента передачи K_{y1} . Второй выход УП соединен с усилителем мощности (У2), предназначенным для усиления сигнала U_3 канала силовой компенсации. У2 имеет защиту от перепада напряжения, а также возможность регулировки коэффициента передачи K_{y2} . Выход каждого усилителя мощности соединен с соответствующей обмоткой моментного двигателя. Измерительный усилитель (ИУ) предназначен для измерения тока, протекающего в цепи обмотки силовой компенсации, путем измерения падения напряжения на добавочном сопротивлении.

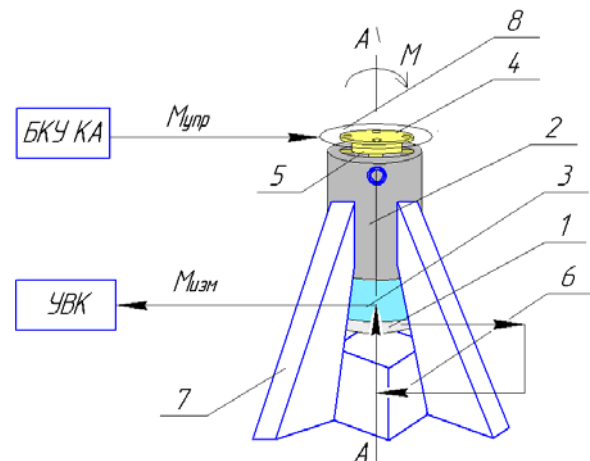


Рис. 1. Конструктивная схема измерительного блока:

1 – датчик угла поворота; 2 – упругая опора;
3 – моментный двигатель; 4 – кронштейн крепления двигателя-маховика; 5 – балка; 6 – блок электроники; 7 – крепление измерительного блока к полу лаборатории;
8 – двигатель-маховик; БК КА – бортовой компьютер КА;
УК – управляющий компьютер

Принцип работы измерительного блока следующий: бортовым компьютером задается значение динамического момента $M_{упр}$, при этом двигатель-маховик создает управляющий момент $M_{удм}$, приводящий к повороту балки на угол φ , что фиксируется датчиком угла. Сигнал $U_{ДУ}$ с датчика угла поступает в блок электроники (БЭ), где он преобразуется, а затем поступает на моментный двигатель. БЭ разбивает сигнал от ДУ на два сигнала.

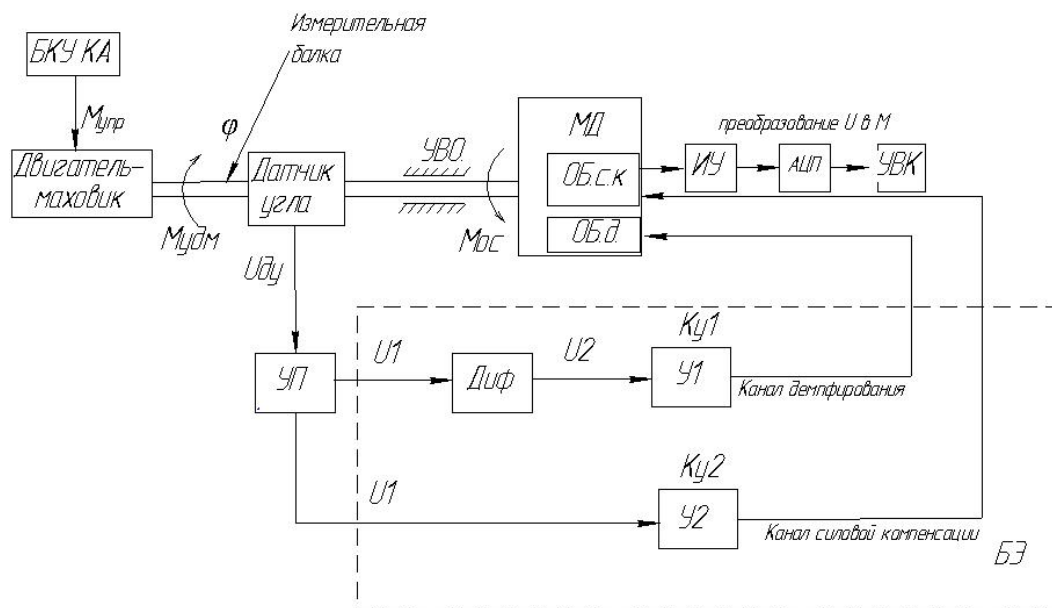


Рис. 2. Функциональная схема измерительного блока:

$M_{упр}$ – задающее значение динамического момента; $M_{удм}$ – динамический момент, создаваемый двигателем – маховиком; φ – угол поворота измерительной балки; $U_{ду}$ – сигнал, создаваемый датчиком угла; БЭ – блок электроники; УП – предварительный усилитель; Диф – дифференциатор; МД – моментный двигатель; БКУ КА – бортовой компьютер КА; У1, У2 – усилители; УВО – упруговязкая опора; $M_{ос}$ – момент, создаваемый моментным двигателем; ИУ – измерительное устройство; УВК – управляющий вычислительный комплекс; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; Об.с.к. – обмотка силовой компенсации датчика момента; Об.д. – обмотка демпфирования датчика момента; kd – коэффициент передачи канала демпфирования (коэффициент усиления по скорости); kck – коэффициент передачи канала силовой компенсации (коэффициент усиления по углу)

Первый служит для формирования канала усиления по скорости (канал демпфирования), второй – для формирования канала усиления по углу (канал силовой компенсации). Оба сигнала поступают в моментный двигатель, который создает момент обратной связи M_{OC} , компенсирующий момент, создаваемый двигателем-маховиком. При этом в обмотке силовой компенсации моментного двигателя протекает ток, значение которого замеряется с помощью измерительного устройства (ИУ), затем аналоговый сигнал поступает в АЦП, где преобразуется в цифровое значение и передается в управляющий вычислительный компьютер (УВК).

Блок электроники обеспечивает требуемые для измерения управляющего момента усиления по углу и скорости путем преобразования, коррекции сигналов датчика угла до уровня и мощности, необходимых для работы датчика момента и измерения тока в его обмотке.

Функциональная схема может быть описана следующими уравнениями:

1. Уравнение движения измерительной балки:

$$\ddot{\phi} = \frac{\Delta M}{Y_0}; \Delta M = M - M_C - M_D, \quad (1)$$

где M – момент, развиваемый управляющим двигателем-маховиком; M_C – момент, развиваемый каналом силовой компенсации; M_d – момент, развиваемый каналом демпфирования.

2. Передаточная функция датчика угла:

$$U_{\text{IV}} = K_{\text{IV}} \cdot \Phi. \quad (2)$$

3. Передаточная функция УП имеет вид

$$U_1 = K_1 \cdot U_{\text{IV}}. \quad (3)$$

4. Передаточная функция дифференциатора имеет вид

$$U_2 = K_{\Pi 1} \cdot U_1 \cdot p. \quad (4)$$

5. Передаточная функция $U1$ имеет вид

$$I_1 = K_{y1} \cdot \frac{U2}{R_{\Pi}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{д}}$ – сопротивление обмотки демпфирования.

6. Передаточная функция U_2 имеет вид:

$$I_{\text{ИЗМ}} = K_{y2} \cdot \frac{U1}{R_C}, \quad (6)$$

где R_C – сопротивление обмотки силовой компенсации;

7. Передаточная функция моментного двигателя:

$$M_C = K_{\text{ЛМ2}} \cdot I_{\text{ИЗМ}}; M_{\text{Л}} = K_{\text{ЛМ1}} \cdot I_1, \quad (7)$$

где $K_{\text{ДМ2}}$ – коэффициент передачи обмотки канала силовой компенсации; $K_{\text{ДМ1}}$ – крутизна характеристики обмотки канала силовой компенсации,

По уравнениям (1)–(7) построена структурная схема функционирования измерительного блока (рис. 3).

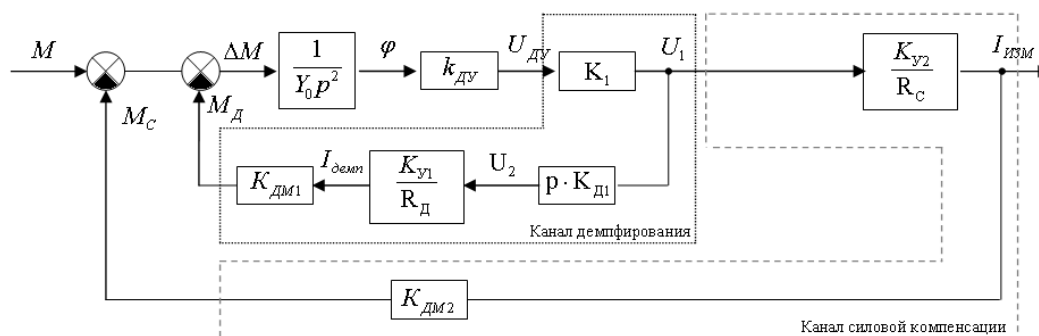


Рис. 3. Структурная схема ИБ

По уравнениям (1)–(7) получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta M = M & - \left[\frac{1}{R_C} \cdot K_{\mathcal{DM}2} \cdot K_{\mathcal{Y}2} \cdot K_1 \cdot \kappa_{\mathcal{DY}} \right] \cdot \Phi + \\ & + \left[\frac{1}{R_{\mathcal{D}}} \cdot K_{\mathcal{DM}1} \cdot K_{\mathcal{Y}1} \cdot K_{\mathcal{D}1} \cdot K_1 \cdot K_{\mathcal{DY}} \right] \cdot \dot{\Phi}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$Kck = \frac{1}{R_C} \cdot K_{\text{DM2}} \cdot K_{y2} \cdot K_1 \cdot \kappa_{\text{DY}}, \quad (9)$$

$$Kd = \frac{1}{R_{\pi}} \cdot K_{\text{дМ1}} \cdot K_{\text{y1}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_1 \cdot K_{\text{дy}}. \quad (10)$$

Уравнение движения системы имеет вид:

$$Y_{\phi} \cdot \ddot{\phi} + Kd \cdot \dot{\phi} + Kck \cdot \phi = M_{\text{впм}}. \quad (11)$$

Зависимость тока $I_{\text{изм}}$ в обмотке датчика момента от угла поворота измерительной балки φ имеет вид

$$I_{\text{ИЗМ}} = \frac{K_{y2} \cdot K_1 \cdot K_{\text{ДУ}} \cdot \varphi}{R_c}. \quad (12)$$

Значения параметров неизменяемой части системы, которые определены выбором элементов, приведены ниже:

$$K_{\text{дУ}} = 5,06 \frac{\text{В}}{\text{рад}};$$

$$K_{\text{ДМ1}} = K_{\text{ДМ2}} = \frac{M_{\text{Д}} \max}{I_1 \max} = \frac{M_{\text{С}} \max}{I_2 \max} = 0,91 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}};$$

$$R_C = R_D = 5 \text{ Ом}; Y_0 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; K_{\text{ск}} = 70 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}.$$

Коэффициент передачи канала демпфирования определен исходя из относительного коэффициента демпфирования $\xi = 0,707$:

$$Kd = 2\xi\sqrt{Y_0 \cdot K_{\text{CK}}} = 2 \cdot 0,707\sqrt{0,1 \cdot 70} = 3,741.$$

По уравнениям (9), (10) определены параметры изменяемой части системы:

$$\frac{K_{\text{ck}} \cdot R_C}{K_{\text{DM2}} \cdot K_{\text{ДУ}}} = K_{y2} \cdot K_1, \quad (13)$$

$$\frac{Kd \cdot R_d}{K_{dM1} \cdot K_{dy}} = K_{y1} \cdot K_{d1} \cdot K_1 ;$$

$$K_{y1} \cdot K_{d1} \cdot K_1 = \frac{3,741 \cdot 5}{0.91 \cdot 5.06} = 4,06. \quad (14)$$

Отношение коэффициентов передачи канала демпфирования и канала силовой компенсации имеет вид

$$\frac{K_{y1} \cdot K_{\text{д1}}}{K_{y2}} = \frac{K_{y1} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_1}{K_{y2} \cdot K_1}. \quad (15)$$

При одинаковых параметрах усилителей мощности $K_{y1} = K_{y2}$, что удобно при технической реализации, коэффициент передачи дифференциатора будет

$$K_{Д1} = \frac{K_{y1} \cdot K_{Д1} \cdot K_1}{K_{y2} \cdot K_1} = \frac{4,06}{76,01} = 0,05.$$

Исходя из того, что операционные усилители имеют выходное напряжение ± 10 В, а для обеспечения тока 1,1 А в обмотках 10,5 Ом, необходимо напряжение ± 12 В. С учетом запаса $\kappa_3 = 1,5$ выбрано $K_{V1} = K_{V2} = 2$.

Коэффициент передачи усилителя-преобразователя:

$$K_1 = \frac{K_{ck} \cdot R_C}{\kappa_{\text{II}M2} \cdot \kappa_{\text{IV}} \cdot K_{Y2}} = \frac{70 \cdot 5}{0,91 \cdot 5,06 \cdot 2} = 38.$$

В результате расчетов получено для канала силовой компенсации:

$$K_{v2} = 2; K_1 = 38.$$

Для канала демпфирования:

$$K_{\text{vI}} = 2; K_1 = 38; K_{\text{II}} = 0,05.$$

Основным конструктивным элементом измерительного узла является упругая вязкая опора (УВО), на которой размещены датчик угла, моментный двигатель, измерительная балка.

Опора обладает высокой радиальной и осевой жесткостями, имеет большую надежность при эксплуатации [5].

На рис. 4 изображены два характерных конструктивных элемента опоры.

Конструкция упругих элементов выполнена из монолитной заготовки, без применения сборочных операций. Каждый упругий элемент содержит два коаксиальных кольца: внутреннее 1 и наружное 2, связанные между собой упругой лентой 3. Упругий элемент

№ 2 содержит узел нагружения ленты. Опора собрана из жестко связанных между собой двух упругих элементов № 1 и одного элемента № 2 так, чтобы оси упругих лент каждого элемента были смещены друг относительно друга на 120° , если смотреть по оси опоры.

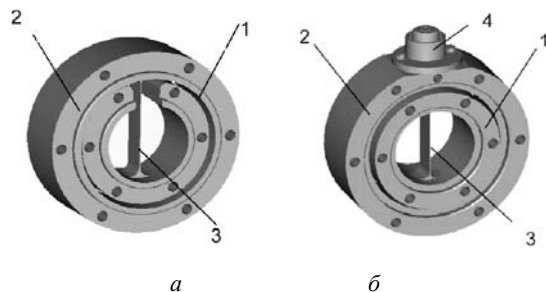


Рис. 4. Упругие элементы опоры:
а – упругий элемент № 1; б – упругий элемент № 2;
1 – внутреннее кольцо; 2 – наружное кольцо; 3 – упругая лента; 4 – узел нагружения

Настройка осуществляется путем подбора усилия нагружения лент. Устройство нагружения позволяет либо растягивать ленту, либо сжимать ее.

В качестве датчика угла поворота измерительной балки выбран бесконтактный оптический угловой датчик SIGNUM RESM. В состав датчик угла SIGNUM RESM входят:

- кольцо с нанесенными масштабными штрихами и встроенной нулевой меткой;
- две считывающие головки с кабелем.

На боковую поверхность кольца, выполненного из нержавеющей стали с интервалом 20 мкм нанесены масштабные штрихи и автофазирующая оптическая нулевая метка.

Две считывающие головки закреплены на корпусе так, что угол между нулевыми метками составляет 180° . Измерение угла поворота балки измерительного блока происходит при считывании отраженного от масштабной шкалы сигнала в считывающей головке. Поскольку угловой датчик SIGNUM RESM установлен непосредственно на ротор моментного двигателя, система свободна от блужданий сервопривода, колебаний, люфтов и различных ошибок, механического гистерезиса, присущих традиционным корпусным датчикам угла, соединенным с валом при помощи муфты, и обеспечивает точность при серии малых инкрементных перемещений [6].

В качестве моментного двигателя в измерительный блок установлен моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора (ДМС 220). ДМС 220 относится к бесконтактным индукторным моментным двигателям постоянного тока типа МД с электромагнитной редукцией частоты вращения ротора, с возбуждением от постоянных магнитов. Он отличается геометрическим выполнением секторных (дуговых) статора и ротора, диаметральной длина которых обеспечивает установленный для каждой модификации ДМС диапазон рабочих углов поворота ротора относительно статора [7].

Узел сборки измерительной балки, датчика угла SIGNUM RESM, упруговязкой опоры и моментного двигателя ДМС 220 изображен на рис. 5.

Элемент крепления внутреннего кольца жестко связывает между собой измерительную балку, внутреннее кольцо упруговязкой опоры, ротор моментного двигателя, датчик угла. Элемент крепления внешнего кольца жестко связывает между собой внешнее кольцо упруговязкой опоры и статор моментного двигателя.

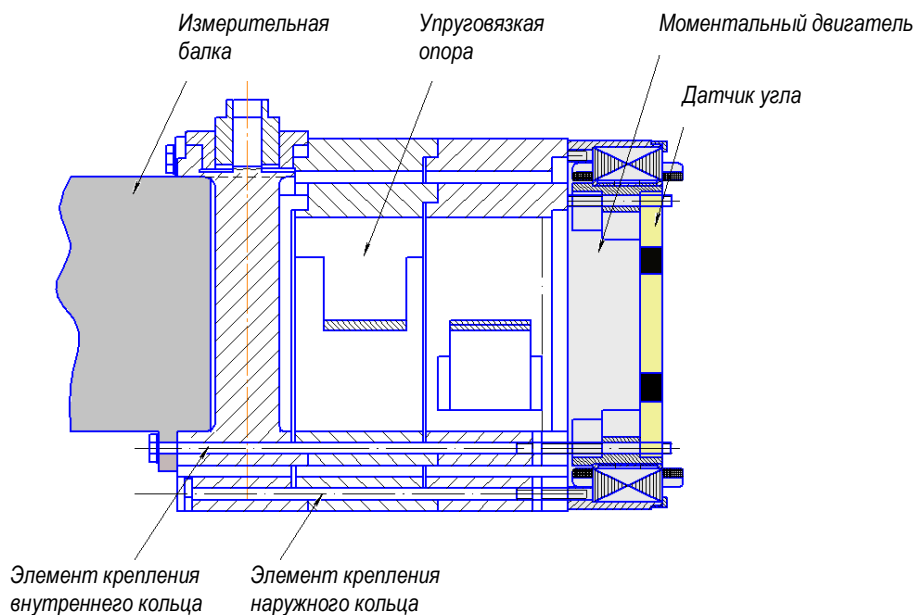


Рис. 5. Узел сборки измерительной балки, датчика угла SIGNUM RESM, упруго-вязкой опоры и моментного двигателя ДМС 220

В результате разработан динамический стенд, позволяющий производить измерения динамического момента одновременно с четырех двигателей-маховиков в диапазоне $\pm 0,9$ Нм, с точностью не менее 10^{-4} Нм. Динамический стенд способен измерять момент непосредственно от двигателя-маховика, что обеспечивает более точную имитацию углового движения КА в замкнутом контуре испытаний СОС КА.

Библиографические ссылки

1. Овчинников М. Ю., Ткачев С. С. Исследование алгоритма трехосной маховичной системы ориентации // Препринты ИПМ им. М. В. Келдышева. 2010. № 25. 32 с.
2. Кузина М. В., Собинин И. С. Измеритель моментов ИМ-15. НПЦ «Полус». Томск, 2006.
3. Синецкий Д. Е., Мурыгин А. В. Динамический стенд для исследования характеристик и режимов работы двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации КА // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 82–86.
4. Schwartz J. L., Peck M. A., Hall C. D. Historical Review of Air-Bearing Spacecraft Simulators, Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2003. Vol. 26, № 4. P. 513–522.
5. Пат. № 2011057 Российская Федерация. МКИ⁵ F16F 3/10. Опора для прецизионных приборов / А. Н. Гормаков, Ю. М. Комашев, В. И. Венеренко; опубл. 1994, Бюл. № 7.
6. Оптические угловые энкодеры SIGNUM RESM и RESR [Электронный ресурс]. URL: <http://www.renishaw.ru>.

7. Степановский Ю. В. Преобразующие устройства приборов. Т. 1. Электродвигатели. Киев : Корнийчук, 2002. 204 с.

Reference

1. Ovchinnikov M. Y., Tkachev S. S. *Preprint IMP im. M. V. Keldisheva*, 2010, № 25, 32 p.
2. Kuzina M. V., Sobinin I. S. *Izmeritel momentov IM-15* (Metre of the moments IM-15). NPC "Poliys", Tomsk, 2006.
3. Sinitskiy D. E., Murigin A. V. *Vestnik SibSAU*, 2013, № 1 (47), p. 82–86.
4. Schwartz J. L., Peck M. A., Hall C. D. *Historical Review of Air-Bearing Spacecraft Simulators, Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2003, vol. 26, № 4, p. 513–522.
5. Pat. 2011057 RF. MКИ F16F 3/10 *Opory dlya precizionnih priborov* (Support for precision devices). A. N. Gormakov, Yu. M. Kolmashev, V. I. Venerenko. Opubl. 1994, Bul. № 7.
6. *Opticheskie uglovye encorderi SIGNUM RESM i RESR* (Optical angular sensors SIGNUM RESM and RESR). Available at: <http://www.renishaw.ru>.
7. Stepanovskiy Yu. V. *Preobrazuyishie ustroystva priborov. T.1. Elektrodvigateli* (Changing instruments of devices. Vol. 1. Electrical engines), Kiev, Kornchuk, 2002, 204 p.

© Синецкий Д. Е., Мурыгин А. В., 2013

УДК 629.78.051.062.2

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУРСОВОГО УГЛА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФАЗОВОГО ЦЕНТРА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ГЛОНАСС» НА УЧАСТКАХ УПРЕЖДАЮЩЕГО РАЗВОРОТА

А. В. Фатеев¹, Д. В. Емельянов¹, Ю. А. Тентилов¹, А. В. Овчинников¹, М. В. Лукьяненко²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Рассмотрен актуальный вопрос минимизации погрешности вычисления фазового центра антенны относительно солнечно-земной системы координат при прохождении особых точек орбиты. Для решения данной проблемы разработаны алгоритмы упреждающего разворота, которые закладываются на борт космического аппарата (КА) и в аппаратуру потребителя. Разработанные алгоритмы дают возможность определять значение курсового угла КА на участках упреждающего разворота. Знание курсового угла позволяет вычислить поправки к координатам фазового центра антенны. Алгоритмы повышают точность определения координат потребителя на участках упреждающего разворота и являются универсальными для всех типов КА навигационной группировки ГЛОНАСС.

Ключевые слова: орбитальная группировка, упреждающий разворот, курсовой угол, алгоритм прогнозирования, фазовый центр антенны, управляющие воздействия, эталонная модель.

ALGORITHMS OF THE COURSE CORNER DEFINITION OF THE SPACE VEHICLE "GLONASS" ON THE SITES OF THE ANTICIPATORY TURN ON THE BOARD AND IN THE EQUIPMENT OF THE CONSUMER FOR THE CALCULATION OF THE AERIAL PHASE CENTER

A. V. Fateev¹, D. V. Emelyanov¹, U. A. Tentilov¹, A. V. Ovchinnikov¹, M. V. Lukyanenko²

¹ JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jelesnogorsk, 662971, Russian Federation

² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

The question of minimisation of an error of the calculation of the aerial phase centre concerning the solar-terrestrial co-ordinate system at the passage of the singular points of an orbit is cosidered. The algorithms of an anticipatory turn which are put aboard the space vehicle and in the consumer equipment are developed. The given algorithms allow to determine the value of a course corner of the space vehicle on the sites of the anticipatory turn. The knowledge of a course corner allows to calculate corrections to the co-ordinates of the aerial phase centre. The developed algorithms allow to raise the accuracy of the co-ordinates setting of the consumer on the sites of the anticipatory turn.

Keywords: *an anticipatory turn, large corners of the Sun-object-earth, small corners of the Sun-object-earth, system GLONASS.*

Полная орбитальная группировка ГЛОНАСС содержит 24 КА на круговых орбитах с наклонением $64,8^\circ$ в трех орбитальных плоскостях по восемь КА в каждой. Долгота восходящих узлов трех орбитальных плоскостей различается номинально на 120° . В каждой орбитальной плоскости восемь КА разнесены по аргументу широты через 45° . Такая конфигурация подсистем КА позволяет обеспечить непрерывное и глобальное покрытие земной поверхности и околоземного пространства навигационным полем [1].

Орбита навигационного КА системы ГЛОНАСС имеет особые точки (при углах Солнце–объект–Земля (СОЗ) близких к 0° – малые углы СОЗ и близких к 180° – большие углы СОЗ), при прохождении которых КА совершает разворот вокруг оси, ориентированной на Землю (ось минус ОХ). С целью уменьшения влияния сил солнечного давления на движение центра масс КА и для минимизации погрешности отслеживания курсового угла, КА совершает симметричный упреждающий разворот вокруг оси минус ОХ.

При прохождении больших углов СОЗ при угле между плоскостью орбиты и направлением на Солнце, меньше заданного значения, формируется упреждающий разворот относительно оси, направленной на Землю, до момента прохождения максимального угла СОЗ. При угле между осью минус ОХ и направлением на Солнце, меньше заданного значения определяются:

- угол в плоскости орбиты между текущим положением КА и положением КА в момент прохождения максимального угла СОЗ;
- угол разворота относительно оси минус ОХ в процессе движения по орбите от текущего положения КА до точки прохождения максимального угла СОЗ;
- время разворота по оси минус ОХ на указанный выше угол при заданной скорости разворота;
- время прохождения по орбите угла от текущего положения до точки прохождения максимального угла СОЗ.

Как только время, необходимое для разворота вокруг оси минус ОХ на вычисленный угол разворота, становится больше времени прохождения по орбите угла от текущего положения КА до точки прохождения максимального угла СОЗ, формируется признак больших углов СОЗ и признак на упреждающий разворот КА. Выключение упреждающего разворота осуществляется после прохождения больших углов СОЗ при угле между плоскостью XOY и плоскостью СОЗ меньше заданного значения.

Малые углы СОЗ характеризуются наличием тени Земли. Приближение теневого участка определяется путем сравнения угла между осью минус ОХ и направлением на Солнце с угловым размером Земли, если угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце меньше углового размера Земли.

При входе в тень отслеживание плоскостью направления на Солнце осуществляется по разности углов: угла, полученного интегрированием углов скорости относительно оси минус ОХ после входа КА в тень Земли, и угла, равного разности текущего угла рыскания и угла рыскания на момент входа КА в тень Земли, рассчитанных программным комплексом баллистических задач (ПК БЗ).

При прохождении в тени Земли малых углов СОЗ, при которых скорость вращения плоскости СОЗ превышает поисковую скорость относительно оси минус ОХ, формируется упреждающий разворот относительно этой оси до момента прохождения минимального угла СОЗ (середины теневого участка).

При угле СОЗ, меньше заданного значения, с использованием информации ПК БЗ определяются:

- угол в плоскости орбиты между текущим положением КА и положением КА в момент прохождения минимального угла СОЗ;
- угол разворота относительно оси минус ОХ от текущего положения КА до точки прохождения минимального угла СОЗ;

– время разворота (T_1) относительно оси минус ОХ на угол, определенный в предыдущем пункте, при заданной скорости разворота;

– время прохождения (T_2) по орбите угла от текущего положения до точки прохождения минимального угла СОЗ.

При $T_1 \geq T_2$ формируется признак упреждающего разворота. Скорость разворота $\sim 0,25$ °/с, время разворота на угол 180° не превышает 15 минут. Угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце, при котором формируется упреждающий разворот, не превышает 2° . Угол СОЗ, при котором разрешается формирование упреждающего разворота, не более 5° . Выключение упреждающего разворота осуществляется после прохождения малых углов СОЗ при угле между плоскостью ХОУ и плоскостью СОЗ, меньше заданного значения.

Для формирования признака упреждающего разворота и знака разворота используются следующие баллистические параметры:

- текущий угол СОЗ;
- текущий угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце.

Положение связанных осей КА относительно солнечно-земной и орбитальной систем координат перед формированием упреждающего разворота показано на рис. 1 [4].

Ниже представлена математическая модель вычисления курсового угла при упреждающем развороте:

$$\psi_x = \begin{cases} \psi_{\text{нач}} + \omega_{\text{нач}} \cdot t + \frac{\dot{\omega} \cdot t^2}{2}, & 0 \leq t \leq t_{\text{разг}}, \\ \psi_1 + \omega_n \cdot t, & t_{\text{разг}} \leq t \leq t_{\text{разг}} + 2t_n, \\ \psi_1 + \psi_2 + \omega_n \cdot (t - t_{\text{разг}} - 2t_n) - \frac{\dot{\omega} \cdot (t - t_{\text{разг}} - 2t_n)^2}{2}, & t_{\text{разг}} + 2t_n \leq t \leq 2t_{\text{разг}} + 2t_n, \end{cases}$$

$$\text{где } \psi_1 = \psi_{\text{нач}} + \omega_{\text{нач}} \cdot t_{\text{разг}} + \frac{\dot{\omega} \cdot t_{\text{разг}}^2}{2}, \quad \psi_2 = \omega_n \cdot (t_{\text{разг}} + 2t_n).$$

В модели упреждающий разворот разделен на три взаимосвязанных участка:

– разгон (участок набора поисковой скорости) – этот участок описывает движение КА вокруг оси минус ОХ (ось направленная на Землю) при наборе поисковой скорости (максимально допустимая скорость вращения аппарата). Набор поисковой скорости характеризуется наличием постоянного углового ускорения;

– разворот на поисковой скорости – описывает движение КА вокруг оси минус ОХ с постоянной максимально допустимой скоростью вращения КА;

– торможения – описывает движение КА вокруг оси минус ОХ при уменьшении угловой скорости КА с постоянным отрицательным ускорением.

На рис. 2 показан принцип работы алгоритма, позволяющего заблаговременно сформировать начальные данные, необходимые для выполнения упреждающего разворота.

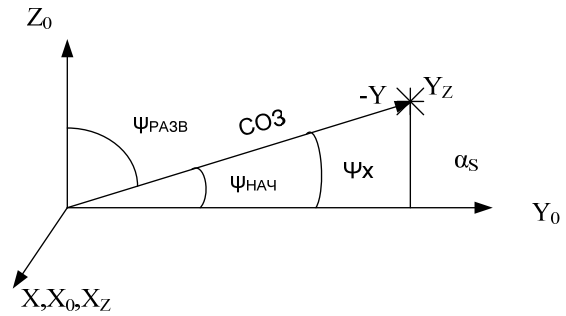


Рис. 1. Положение связанной системы координат (ОХУЗ) относительно солнечно-земной (ОХ₀У₀З₀) и орбитальной (ОХ₀У₀З₀) систем координат: α_s – угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце; СОЗ – текущий угол Солнце–объект–Земля; $\psi_{\text{нач}}$ – значение курсового угла перед началом упреждающего разворота; $\psi_{\text{разв}}$ – угол разворота относительно оси ОХ в процессе движения по орбите от текущего положения КА до точки прохождения максимального угла СОЗ, в которой ось ОУ должна быть перпендикулярна плоскости орбиты

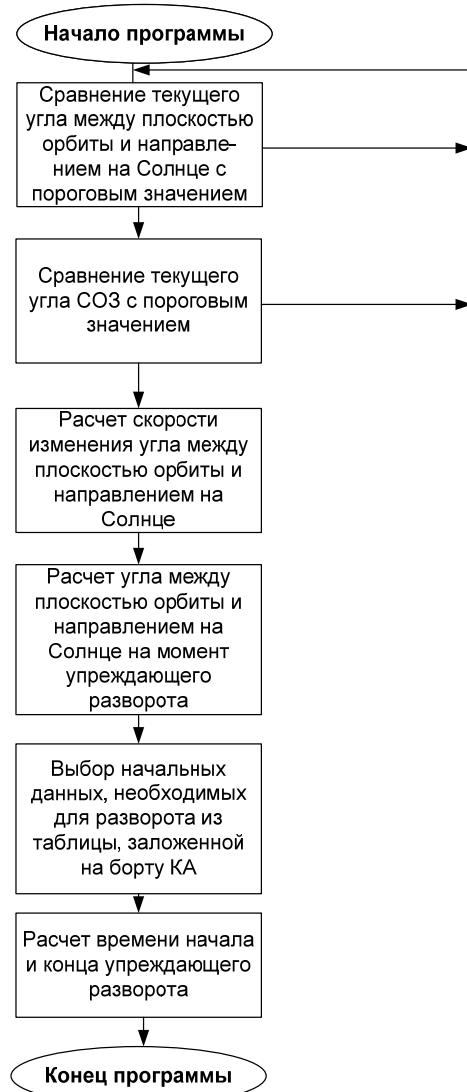


Рис. 2. Блок-схема алгоритма прогнозирования начальных данных упреждающего разворота

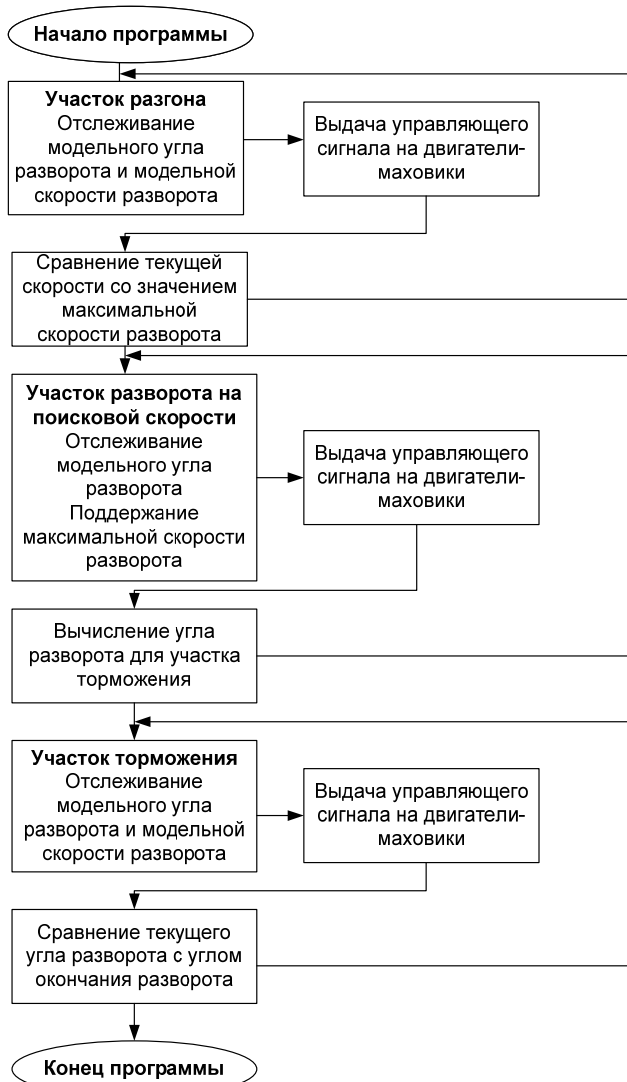


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления курсового угла при упреждающем развороте на борту космического аппарата

Сформированные начальные данные передаются в аппаратуру потребителя через навигационный кадр.

Эталонные модели упреждающего разворота на борту и в аппаратуре потребителя одинаковые, следовательно, время начала упреждающего разворота, фактический угол разворота КА по каналу рыскания и расчетный угол разворота КА по каналу рыскания на борту и в аппаратуре потребителя будут также одинаковы.

На КА управляющие двигатели-маховики (УДМ) имеют разброс по крутизне моментной характеристики. Момент сопротивления на валу УДМ также иска-

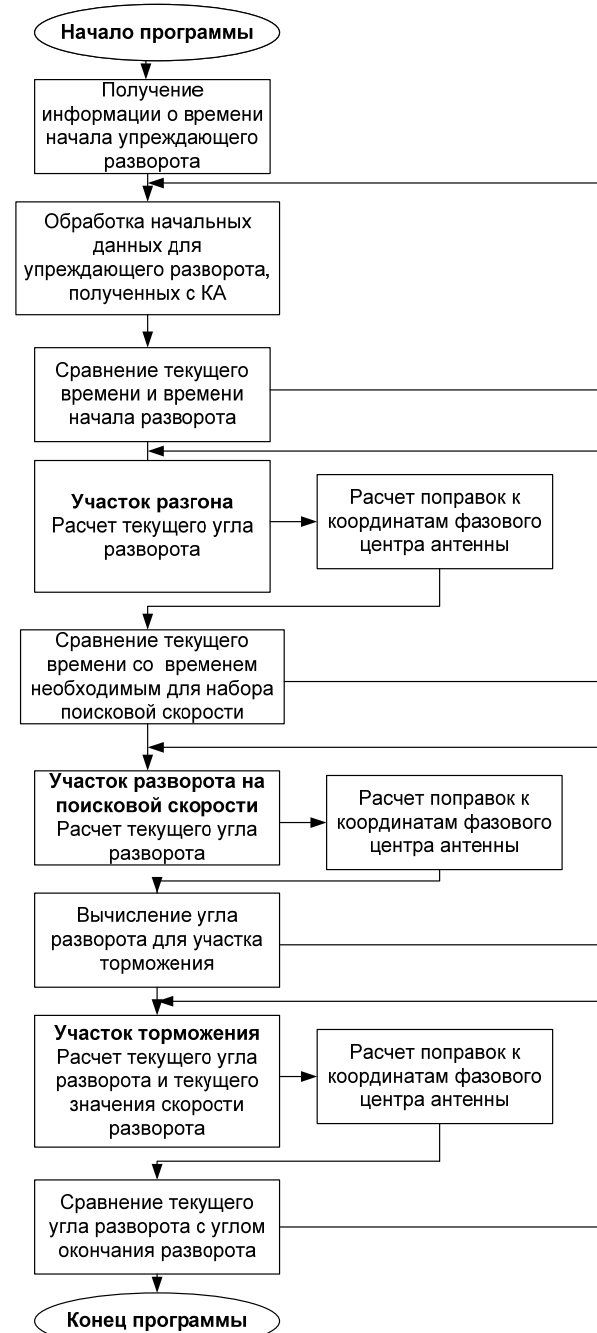


Рис. 4. Блок-схема алгоритма вычисления в аппаратуре потребителя поправки положения фазового центра антенны

жает моментную характеристику УДМ. Момент инерции КА относительно оси ОХ также имеет разброс [2].

Исходя из этого, величина $\dot{\omega} = \frac{M_x}{J_x}$ не имеет постоянного значения. Поэтому при проведении упреждающего разворота будут возникать существенные погрешности по углу разворота КА.

Для минимизации погрешностей, обусловленных разбросом характеристик УДМ и разбросом момента инерции КА относительно оси ОХ, рассматривается

алгоритм формирования управляющих воздействий по каналу ОХ, с дополнительным формированием управляющих воздействий на двигатель-маховик по оси ОХ при рассогласовании по углу и скорости фактического и модельного движения КА.

На рис. 3 представлен принцип работы алгоритма вычисления курсового угла при упреждающем развороте на борту навигационного КА.

Потребитель проводит измерения положения фазового центра антенны, а должен знать положение центра масс КА. В связи с этим при прохождении особых точек орбиты в аппаратуре потребителя необходимо вычислять поправки на положение фазового центра антенны.

На рис. 4 представлен принцип работы алгоритма вычисления в аппаратуре потребителя поправки положения фазового центра антенны.

Алгоритмы, описанные в данной статье, являются универсальными для всех типов космических аппаратов навигационной группировки ГЛОНАСС.

Погрешность определения ориентации по каналу рыскания с использованием разработанных алгоритмов при прохождении упреждающего разворота не превышает 15', при этом погрешность определения положения фазового центра антенн в плоскости OY_0Z_0 относительно номинального положения не бу-

дет превышать 4,5 мм при расстоянии от оси минус ОХ до центра антенны 1 м.

Библиографические ссылки

1. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения. Красноярск, 2011. С. 119–147.
2. Иванов Н. М., Лысенко Л. Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М : Дрофа, 2004. С. 193–235.

References

1. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* (The bases of designing of space vehicles of information support). Krasnoyarsk, 2011, p. 119–147.
2. Ivanov N. M., Lisenko L. N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* (Ballistics and navigation of space vehicles). Moscow, Drofa, 2004, p. 193–235.

© Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентилов Ю. А.,
Овчинников А. В., Лукьяненко М. В., 2013

РАЗДЕЛ
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

УДК 544.18

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИИ ЛИТИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДИОКСИДОВ ТИТАНА И ОЛОВА*

Н. С. Елисеева, З. И. Попов, А. С. Федоров, А. А. Кузубов, М. А. Высотин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: zipcool@bk.ru

Методом формализма функционала плотности DFT проведено исследование геометрической структуры пластин нанометровой толщины составов SnO_2 и TiO_2 , а также свойств диффузии атомов лития в них. Рассчитано оптимальное положение атомов лития на поверхности и в приповерхностных слоях нанопластин. Показано, что атомы лития эффективно адсорбируются на поверхности оксидов, причем наиболее выгодным положением атома лития при сорбции на поверхности является положение над атомом металла. Рассчитаны высоты потенциальных барьеров перехода атомов лития между оптимальными положениями и показано, что атомы лития могут проникать внутрь пластин только путем близлежащей трансформации структуры оксида.

Ключевые слова: оксид олова, оксид титана, литий, первопринципные расчеты, диффузия.

THEORETICAL INVESTIGATION OF LITHIUM DIFFUSION ON THE SURFACE AND SUBSURFACE LAYERS OF TITANIUM DIOXIDE AND TIN DIOXIDE

N. S. Eliseeva, Z. I. Popov, A. S. Fedorov, A. A. Kuzubov, M. A. Visotin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: zipcool@bk.ru

The geometric structure of the plates of nanometer thickness compositions SnO_2 and TiO_2 , as well as the properties of the diffusion of lithium atoms in them were investigated by using the method of the density functional theory (DFT). The optimal position of the lithium atoms on the surface and subsurface layers of nanoplates was calculated. It is shown that lithium atoms effectively adsorbed on the surface of the oxide, and the most advantageous location of the lithium atom in the sorption on the surface of a position is above the metal atom. The height of the potential barriers of the transition of lithium atoms between the optimal positions is calculated and it is shown that lithium atoms can penetrate the plate only by the transformation of the nearby structure of the oxide.

Keywords: tin oxide, titanium oxide, lithium ab initio calculations, diffusion.

В настоящее время в связи с удорожанием углеводородов, уменьшением их запасов и ростом экологических проблем в энергетике все чаще используются подходы так называемой альтернативной энергетики. Наиболее часто используемый способ получения альтернативной энергии основан на расщеплении ядер тяжелых атомов в атомных электростанциях. Полученная таким способом электроэнергия составляла 34 % от общего количества произведенной энергии в Европе в 2002 г. [1]. Несмотря на то, что выбросы углекислого газа при таком способе производства энергии пренебрежимо малы по сравнению с теплоэлектростанциями, вокруг атомной энергетики не утихают споры из-за высокой радиоактивности образующихся отходов, многие из которых обладают огромным периодом полураспада. Другой широко используемый метод получения альтернативной электрической энергии – гидроэлектростанции. К сожалению,

их использование зависит от наличия значительных гидроресурсов. При этом электроэнергия является наиболее удобным видом энергии, экологически чистым и очень эффективно передаваемым на большие расстояния.

К сожалению, данный вид энергии тяжело поддается аккумулярованию, хотя при этом есть огромное количество мобильных потребителей, в которых необходимо запастись этой энергией. Прежде всего, это потенциально огромная армия электромобилей, при переводе на которые экологическая обстановка, особенно в крупных городах, кардинально улучшится. Второе бурно растущее направление – это рынок мобильных устройств, в которые постоянно включаются все новые и новые устройства (портативные компьютеры, мобильный электроинструмент и др.). И здесь одними из самых перспективных типов аккумуляторов являются литий-ионные аккумуляторы.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0163, и грантов РФФИ № 12-02-00640, № 12-03-31323, № 14-02-31309.

Развитие данного типа аккумуляторов в настоящее время является одной из самых актуальных задач в области источников тока ввиду их перспективности, широкого использования в электронных устройствах и даже в автомобилестроении ближайшего будущего. По сравнению с другими перезаряжаемыми батареями, такими как кислотные-свинцовые, никель-кадмиевые и никель-металл-гидридные, литий-ионные батареи обладают большим удельным зарядом, рабочим напряжением и меньшим током саморазряда. К тому же они не имеют эффекта памяти.

На сегодняшний день основным материалом анодов современных литий-ионных батарей является графит, который обладает адсорбционной емкостью по литию 372 мА·ч/г, а также материалы на его основе, например кокс. При внедрении ионы лития слегка раздвигают слои углеродной матрицы (графеновых листов) и располагаются между ними, образуя интеркалаты. Ввиду достаточно большого расстояния между слоями sp^2 -гибридизированного углерода, удельный объем углеродных материалов в процессе интеркаляции/деинтеркаляции ионов лития меняется незначительно, что является положительной чертой данных материалов. К сожалению, в таких материалах происходит значительный перенос электрического заряда с атомов лития на слои графита, что ведет к существенному отталкиванию ионов лития. Это приводит к тому, что максимальное содержание лития в графите соответствует фазе LiC_6 . Поэтому сейчас широко изучаются материалы для следующего поколения литий-ионных батарей [2; 3]. Перспективными материалами для анодов в литий-ионных аккумуляторах могут выступить диоксиды титана и олова TiO_2 и

SnO_2 [4] в структуре рутила. Теоретическое исследование диффузии лития в приповерхностных слоях этих материалов представлено в нашей работе.

Все расчеты в работе проводились с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [5–7] в рамках метода функционала плотности (DFT) [8; 9] с использованием базиса плоских волн и PAW формализма [10; 11]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционного функционала PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей вандерваальсово взаимодействие [12].

На начальном этапе работы была смоделирована структура объемных материалов TiO_2 и SnO_2 типа рутила. Элементарные ячейки этих материалов показаны на рис. 1. Элементарная ячейка типа рутила SnO_2 и TiO_2 содержит 2 атома металла и 4 атома кислорода и принадлежит к пространственной группе $P42/mnm$.

При оптимизации геометрии элементарной ячейки первая зона Брюллюэна (1BZ) обратного пространства автоматически разбивалась на сетку $12 \times 12 \times 12$, выбранную по схеме Монхорста–Пака [13]. Энергия обрезания плоских волн E_{cutoff} в расчетах была равна 400 эВ. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/Å.

Полученные в ходе расчета параметры решеток TiO_2 и SnO_2 хорошо согласуются с экспериментальными [14–16] и теоретически полученными ранее данными [17] (табл. 1).

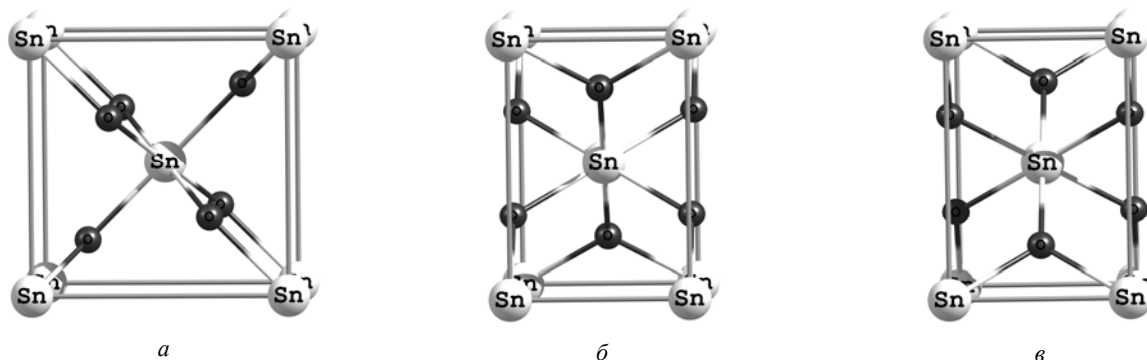


Рис. 1. Элементарная ячейка SnO_2 , вид: а – 001; б – 010; в – 001

Таблица 1

Экспериментально определенные и рассчитанные параметры решеток TiO_2 и SnO_2

Параметры решетки			a , Å	b , Å	c , Å
TiO_2	Экспериментальные [14]		4,5936	4,5936	2,9587
	Рассчитанные	Данная работа	4,5680	4,5680	2,9633
		Работа [17]	4,5936	4,5936	3,0040
SnO_2	Экспериментальные [15; 16]		4,7250	4,7250	3,1657
	Рассчитанные	Данная работа	4,7274	4,7274	3,2280
		Работа [17]	4,7370	4,7370	2,9683

Далее, исходя из параметров элементарной ячейки, проводилось моделирование тонких периодических пластин TiO_2 и SnO_2 с поверхностью (110), которые представляли собой суперячейки, содержащие $1 \times 1 \times 2$, $1 \times 1 \times 3$, $1 \times 1 \times 4$ ячейки с данным типом поверхности (110), покрытой атомами кислорода. Из-за использования программы с периодическими граничными условиями в процессе моделирования пластин между ними задавался вакуумный промежуток $20 \text{ \AA}$ вдоль нормали к поверхности пластины. Его величина подбиралась исходя из предположения, что при таком расстоянии соседние поверхности не будут взаимодействовать друг с другом. При нахождении оптимальной геометрии пластин количество k -точек вдоль каждого из направлений составляло $6 \times 10 \times 1$. Минимальная толщина пластинки подбиралась исходя из значений поверхностной энергии. Согласно полученным результатам толщины пластин $1 \times 1 \times 3 \text{ TiO}_2$ (110) ($19,72 \text{ \AA}$) и SnO_2 (110) ($20,22 \text{ \AA}$) были достаточны для корректного описания поверхностной энергии. Полученные значения поверхностной энергии равнялись $0,67 \text{ Дж/м}^2$ (TiO_2 (110)) и $1,47 \text{ Дж/м}^2$ (SnO_2 (110)), что хорошо согласуется с рассчитанными другими авторами значениями $0,67 \text{ Дж/м}^2$ [17] и $1,56 \text{ Дж/м}^2$ [17].

Для изучения сорбции и диффузии атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях TiO_2 (110) и SnO_2 (110) была смоделирована пластина в виде суперячейки $2 \times 4 \times 3$ ячейки. При этом для нахождения оптимальной геометрии пластин, ввиду достаточно больших размеров суперячейки, количество k -точек вдоль каждого из направлений составляло $2 \times 2 \times 1$. Для определения наиболее выгодных позиций одиночного атома лития на поверхности и в приповерхностных слоях TiO_2 (110) и SnO_2 (110) были рассчитаны структуры с различным его расположением (рис. 2).

Расчет энергии связи E_{bind} атома лития с поверхностью SnO_2 (110) (табл. 2) рассчитывался по формуле

$$E_{\text{bind}} = E_{\text{LiMO}_2} - E_{\text{MO}_2} - E_{\text{Li}}, \quad (1)$$

где E_{LiMO_2} – полная энергия системы TiO_2 (110) (SnO_2 (110)) с адсорбированным атомом лития; E_{MO_2} –

полная энергия суперячейки TiO_2 (110) (SnO_2 (110)); E_{Li} – полная энергия в расчете на один атом лития в его кристаллической решетке (BCC).

Как видно из табл. 2, атомы лития эффективно адсорбируются на поверхности оксидов, причем наиболее выгодным положением атома лития при сорбции на поверхности является положение 5 (над атомом металла).

Следующим шагом были рассчитаны величины потенциальных барьеров для перехода атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях пластины. Данные расчетов представлены в табл. 3 для переходов в структуре SnO_2 и TiO_2 .

Из табл. 3 видно, что переход с поверхности в объем материала сопровождается высоким потенциальным барьером, что свидетельствует о невозможности такого процесса. Экспериментально наблюдаемая диффузия лития внутрь данных структур рутила очевидно связана с глубокой перестройкой кристаллической решетки, содержащей атомы лития в порах, о чем убедительно свидетельствуют экспериментальные данные из [18].

В ходе выполнения работы с помощью проведения первопринципных DFT-расчетов были получены значения высот потенциальных барьеров для переходов атомов лития между оптимальными положениями в поверхностных и приповерхностных слоях оксидов титана и олова. Атомы лития эффективно адсорбируются на поверхности оксидов, причем наиболее выгодным положением атома лития при сорбции на поверхности является положение над атомом металла. При этом диффузия лития внутрь данных структур рутила, очевидно, связана с глубокой перестройкой кристаллической решетки материала.

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), суперкомпьютерному центру МГУ (Москва), а также Информационно-вычислительному центру НГУ (Новосибирск) за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых и были произведены все расчеты.

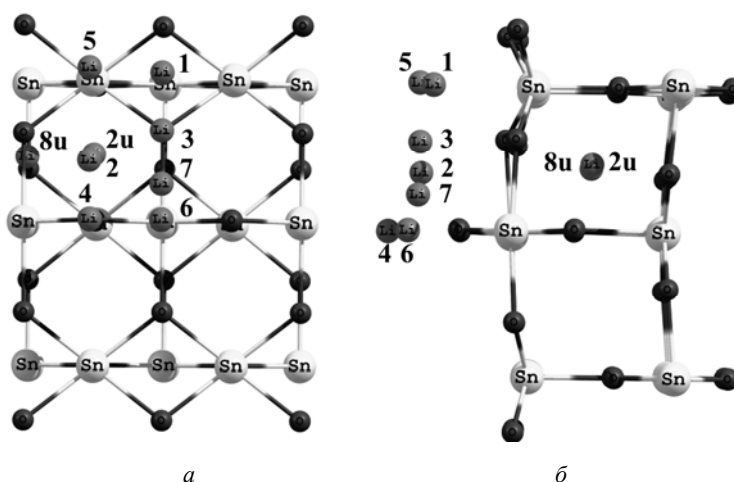


Рис. 2. Различные положения атома лития на поверхности и в приповерхностных слоях SnO_2 (110): a – вид сверху; b – вид сбоку

Таблица 2

Величины энергии связи E_{bind} атома лития с поверхностью TiO_2 (110) и SnO_2 (110) в зависимости от его расположения

Положения атома лития	Энергия связи, эВ	
	TiO_2	SnO_2
1	–0,997	–1,585
2	–1,831	–2,604
3 (переход в положение 7)	–1,999	–2,997
4	–1,413	–2,632
5	–2,018	–3,096
6	–0,433	–0,941
7	–2,014	–3,002
2u	–1,747	–2,526
8u	–2,008	–2,240

Таблица 3

Величины потенциальных барьеров перехода атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях TiO_2 (110) и SnO_2 (110) в зависимости от пути миграции

Путь миграции атома лития	Потенциальный барьер перехода, эВ			
	В прямом направлении		В обратном направлении	
	TiO_2	SnO_2	TiO_2	SnO_2
1-6	0,60	0,64	0,03	0,00
1-7	0,06	0,01	1,09	1,43
2-4	0,48	0,05	0,05	0,08
2-6	1,43	1,70	0,01	3,36
2-7	0,12	0,01	0,30	0,41
5-4	0,65	0,47	0,04	0,00
5-7	0,07	0,09	0,07	0,00
2u-8u	0,07	0,02	0,31	0,30
2u_2u (продвижение вглубь)	2,50	2,55	2,77	2,65
8u-8u (движение вдоль одного слоя)	2,68	2,91	2,67	2,91
2-2u	2,24	2,31	2,17	1,95

References

1. Nuclear power: Europe report. Atw-International Journal for Nuclear Power. 2003, vol. 48, p. 624.
2. Winter M., Besenhard J. O. Electrochemical lithiation of tin and tin-based intermetallics and composites. *Electrochim. Acta*. 1999, vol. 45, p. 31.
3. Huggins R. A. Lithium alloy negative electrodes. *J. Power Sources*. 1999, vol. 81–82, p. 13.
4. Ortiz G. F., Hanzu I., Lavela P., Knauth P., Tirado J. L., Djenizian T. Nanoarchitected TiO_2/SnO : A Future Negative Electrode for High Power Density Li-Ion Microbatteries? *Chem. Mater.* 2010, vol. 22 (5), p. 1926–1932.
5. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B*. 1993, vol. 47, p. 558–561.
6. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium. *Phys. Rev. B*. 1994, vol. 49, p. 14251–14269.
7. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B*. 1996, vol. 54, p. 11169–11186.
8. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Phys. Rev.* 1964, vol. 136, № 3B, p. 864–871.
9. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Phys. Rev.* 1965, vol. 140, № 4A, p. 1133–1138.
10. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B*. 1994, vol. 50, 17953 p.
11. Kresse G., Joubert G. D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B*. 1999, vol. 59, 1758 p.
12. Grimme S. Semiempirical GGA-type density

functional constructed with a long-range dispersion correction. *J. Comp. Chem.* 2006, vol. 27, 1778 p.

13. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B.* 1976, vol. 13, p. 5188–5192.

14. Bates S. P., Kresse G., Gillan M. J. A systematic study of the surface energetics and structure of $\text{TiO}_2(110)$ by first-principles calculations. *Surf. Sci.* 1997, vol. 385, 386 p.

15. Baur W. H. Über die Verfeinerung der Kristallstrukturbestimmung einiger Vertreter des Rutiltyps: TiO_2 , SnO_2 , GeO_2 und MgF_2 . *Acta Cryst.* 1956, vol. 9, 515 p.

16. Haines J., Leeger J. M. X-ray diffraction study of the phase transitions and structural evolution of tin dioxide at high pressure: Relationships between structure

types and implications for other rutile-type dioxides. *Phys. Rev. B.* 1997, vol. 55, 11144 p.

17. Beltra'n A., Andre's J., Sambrano J. R., Longo E. Density Functional Theory Study on the Structural and Electronic Properties of Low Index Rutile Surfaces for $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ and $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ Composite Systems. *J. Phys. Chem. A.* 2008, vol. 112, 8943 p.

18. Huang J. Y., Zhong Li, Wang C. Min, Sullivan J. P. et al. In situ observation of the electrochemical lithiation of a single SnO_2 nanowire Electrode. *SCIENCE*. 2010, vol. 330, № 10, p. 1515–1520.

© Елисеева Н. С., Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Высотин М. А., 2013

УДК 544.1, 544.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ ЛИГАНДОВ НА СВЯЗЫВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА С ПОЛОВИННОЙ МОДЕЛЬЮ АКТИВНОГО ЦЕНТРА [NiFe]-ГИДРОГЕНАЗЫ*

А. Д. Еремина^{1,2}, А. А. Кузубов^{1,2}, С. А. Варганов¹, А. О. Лыхин^{1,2}, М. В. Сержантова¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: wollen07@yandex.ru, alexandr_lykhin@mail.ru

Для описания половинной модели активного центра [NiFe]-гидрогеназы подобран функционал плотности. Методом связанных кластеров с учетом однократных и двукратных, а также трехкратных возбуждений по теории возмущения определены энергии связывания молекулярного водорода с двухвалентным атомом железа комплекса $[\text{FeCO}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_2\text{H}_2]^{2-}$. Показано, что атом железа в комплексах $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_3\text{H}_2]$, $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_3\text{H}_2]^{3-}$, $[\text{FeCN}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_2\text{H}_2]^{1-}$, $[\text{FeCO}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_2\text{H}_2]^{2-}$ находится в октаэдрическом поле лигандов. Исследовано связывание H_2 с атомом железа в зависимости от природы лигандов. Определено, что все смоделированные структуры являются комплексами Кубаса.

Ключевые слова: [NiFe]-гидрогеназа, CCSD(T), теория функционала плотности (DFT).

INFLUENCE OF THE LIGANDS ON THE MOLECULAR HYDROGEN BINDING WITH A HALF-MODEL OF THE [NiFe]-HYDROGENASE ACTIVE SITE

A. D. Eremina^{1,2}, A. A. Kuzubov^{1,2}, S. A. Varganov¹, A. O. Lykhin^{1,2}, M. V. Serzhantova¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: dskalyakin@mail.ru, alexandr_lykhin@mail.ru

The density functional for the characterization of the half-model [NiFe]-hydrogenase active site is defined. The binding energy of the molecular hydrogen with ferrous iron in $[\text{FeCO}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_2\text{H}_2]^{2-}$ complex is determined by the coupled cluster with the full treatment singles and doubles and estimate to the connected triples contribution using many-body perturbation theory. The results show that ligands in $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_3\text{H}_2]$, $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_3\text{H}_2]^{3-}$, $[\text{FeCN}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_2\text{H}_2]^{1-}$, $[\text{FeCO}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_2\text{H}_2]^{2-}$ complexes form a distorted octahedral coordination with ferrous iron. The substitution of the CO by CN ligand in complex $[\text{FeCO}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_2\text{H}_2]^{2-}$ leads to the stabilization of molecular hydrogen in the vertex of octahedron and elongation H-H bond. It is determined that all modeled structures are Cubas complexes.

Keywords: [NiFe]-hydrogenase, CCSD, CCSD(T), density functional theory (DFT).

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0916.

Окисление молекулярного водорода и восстановление протонов посредством [NiFe]-гидрогеназы – яркий пример использования переходных металлов в качестве катализаторов для важнейших биологических реакций и промышленных процессов. Часто в роле веществ ускоряющих химическую реакцию выступают дорогие и редкие металлы платиновой группы [1; 2]. В настоящее время ведутся разработки по созданию нового поколения перспективных катализаторов на основе недорогих и широко распространенных переходных металлов, таких как железо или никель. Одним из подходов к их созданию является использование биологических катализаторов, например металлоэнзим [NiFe]-гидрогеназа, способный окислять и восстанавливать молекулярный водород [3; 4].

Благодаря совершенствованию методов рентгеновской дифракции оказалось возможным определение структур металлоэнзимов катализирующих данные реакции [5–7]. Активный центр [NiFe]-гидрогеназы глубоко погружен в молекулу фермента и является достаточно сложной структурой. Можно отметить, что в его синтез одновременно вовлечены АТФ и ГТФ, а также, по крайней мере, 7 различных ферментов. Получение прямых аналогов активных центров гидрогеназ невероятно тяжелая задача на стыке органического и неорганического синтеза [8].

Также большое значение приобретают исследования функционирования гидрогеназ в области материаловедения, в частности при разработке материала электродов фотобиокаталитических систем. Их основой служат наноструктурированные мезопористые пленки TiO_2 , поверхность которых модифицирована иммобилизованными ферментами [9].

За последние 10 лет был синтезирован ряд структурных моделей активного центра [NiFe]-гидрогеназы [10–12]. Тем не менее оказалось, что эти модели неспособны катализировать окисление водорода. Чтобы понять причину отсутствия каталитической активности, необходимо определить механизм катализа и роль воздействия аминокислотного окружения на активный центр [NiFe]-гидрогеназы.

В данной работе была рассмотрена как половинная модель активного центра [NiFe]-гидрогеназы, включающая атом Fe, окруженный двумя цианидными,

двумя тиометильными и одной карбонильной группами так и ее различные модификации (рис. 1).

На начальном этапе проводилась оптимизация комплексов железа в синглетном и триплетном состоянии, расчеты показали, что энергетически более выгодным является синглетное состояние, данный результат согласуется теорией кристаллического поля. Поэтому в дальнейшем для изучения сорбции водорода было выбрано синглетное состояние комплексов железа. Далее проводилось выявление наиболее энергетически выгодного положения молекулы водорода посредством оптимизации геометрий. При этом в ходе расчетов рассматривались всевозможные варианты ориентации H_2 относительно комплекса. Оптимизация геометрических параметров комплекса со связанным водородом проводилась до достижения минимального значения энергии, что соответствует образованию устойчивой системы. Таким образом, был определен наиболее энергетически выгодный конформер, который и был рассмотрен в дальнейших расчетах. В рамках формализма теории функционала плотности в базисных наборах def2-tzvp и def2-tzvpd была оптимизирована геометрия комплекса двухвалентного железа в синглетном состоянии с помощью обменно-корреляционного функционала PBE и различных гибридных функционалов: PBE0, M06, B3LYP (табл. 1 и 2). Также была использована дисперсионная поправка для PBE [13] и B3LYP функционалов. Расчеты выполнялись в квантово-химическом пакете GAMESS [14; 15] до достижения стандартных критериев сходимости. Расчет энергии связывания водорода с активным центром проводился по следующей формуле:

$$E_b = E_{\text{АЦ}} + E_{\text{H}_2} - E_{\text{АЦ+H}_2}, \quad (1)$$

где E_b – энергия связывания, $E_{\text{АЦ+H}_2}$ – полная энергия активного центра со связанным водородом, $E_{\text{АЦ}}$ – полная энергия активного центра, E_{H_2} – полная энергия молекулы водорода.

Положительные значения энергии связывания свидетельствует об энергетической выгоде присоединения водорода. Отрицательные энергии характеризуют систему, как находящуюся в метастабильном состоянии.

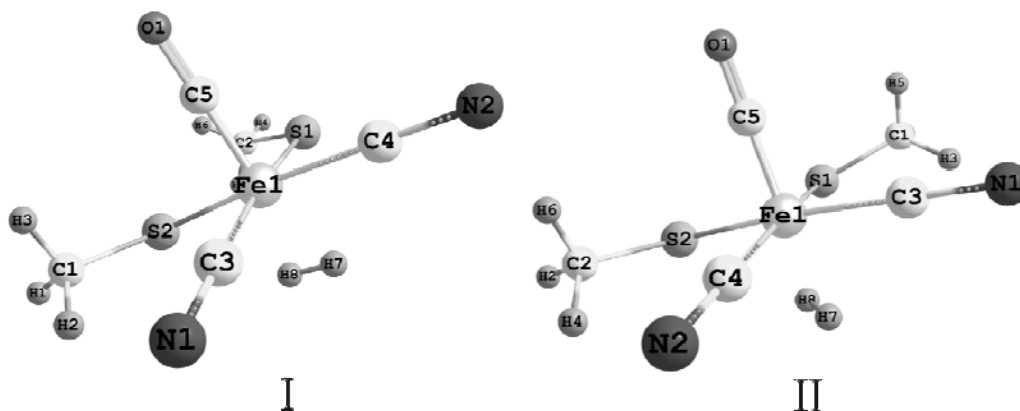


Рис. 1. Структуры половинной модели [NiFe]-гидрогеназы оптимизированные PBE без наложения ограничений по симметрии (I) и с симметрией C_s (II)

Расширение базисного набора за счет включения диффузных функций приводит к незначительному увеличению энергии связывания. В то же время разные функционалы не вносят существенных изменений в геометрию комплекса. Для выбора функционала, наиболее корректно описывающего данную систему, проводился расчет высокоточным методом связанных кластеров с учетом одинарных, двойных (CCSD) и тройных возбуждений (CCSD(T)) [17] (табл. 3).

В соответствии с данными табл. 1 и 3 наиболее согласованными с CCSD(T) являются функционалы PBE и B3LYP, показывающие, что взаимодействие водорода с активным центром приводит к переходу системы в метастабильное состояние. В свою очередь метод Хартри-Фока (HF), теория возмущения второго порядка (MP2) и CCSD переоценивают энергию свя-

зывания. Введение дисперсионной поправки также дает завышенные результаты, поэтому в дальнейших расчетах она не учитывалась. Функционал PBE был выбран для оценивания влияний лигандов на энергию связывания. Рассмотрение конформера с симметрией C_s (рис. 1) с использованием PBE и базисного набора def2-tzvpd также показало хорошее согласование с методом связанных кластеров.

Для исследования влияния природы лигандов на связывание молекулярного водорода с половинной моделью активного центра [NiFe]-гидрогеназы были смоделированы структуры комплексов, в которых варьировалось соотношение между карбонильными и цианидными лигандами. Оптимизированные структуры комплексов с молекулярным водородом $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_3]$, $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_3]^{3-}$, $[\text{FeCN}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_2]^{1-}$ представлены на рис. 2.

Таблица 1

Энергии связывания водорода с активным центром гидрогеназы и длины связи в зависимости от функционала в базисном наборе def2-tzvp

Параметры	Функционал					
	PBE	PBE0	PBE_D	M06	B3LYP	B3LYP_D
$E_b(\text{Fe-H}_2)$, ккал/моль	-2,4	1,5	5,5	2,9	-2,1	-0,3
$r(\text{Fe-H7})$, Å	1,79	1,76	1,79	1,75	1,83	1,83
$r(\text{Fe-H8})$, Å	1,78	1,75	1,78	1,74	1,82	1,81
$r(\text{H7-H8})$, Å	0,80	0,79	0,80	0,80	0,77	0,77

Примечание. В табл. 1 использованы следующие обозначения: PBE_D и B3LYP_D – функционалы с дисперсионной поправкой Гримме третьего поколения [16].

Таблица 2

Энергии связывания водорода с активным центром гидрогеназы и длины связи в зависимости от функционала в базисном наборе def2-tzvpd

Параметры	Функционал		
	PBE	PBE0	B3LYP
$E_b(\text{Fe-H}_2)$, ккал/моль	-2,3	1,5	-2,0
$r(\text{Fe-H7})$, Å	1,79	1,76	1,83
$r(\text{Fe-H8})$, Å	1,78	1,75	1,81
$r(\text{H7-H8})$, Å	0,80	0,79	0,77

Таблица 3

Энергии связывания молекулярного водорода с атомом Fe активного центра половинной модели [NiFe]-гидрогеназы, базисный набор def2-tzvp

Метод расчета	Функционал						
	PBE	PBE0	PBE_D	M06	B3LYP	B3LYP_D	PBE* (C_s)
HF	3,1	1,0	3,1	-2,6	2,3	2,3	2,6
MP2	0,3	1,2	0,3	3,0	0,8	0,8	1,2
CCSD	0,7	0,3	0,7	0,1	0,4	0,4	1,3
CCSD(T)	-1,1	-1,2	-1,1	-1,2	-1,2	-1,2	0,03

Примечание. В табл. 3 использованы следующие обозначения: PBE_D и B3LYP_D – функционалы с дисперсионной поправкой Гримме третьего поколения, PBE* (C_s) – расчет с наложением C_s симметрии и def2-tzvpd базисным набором.

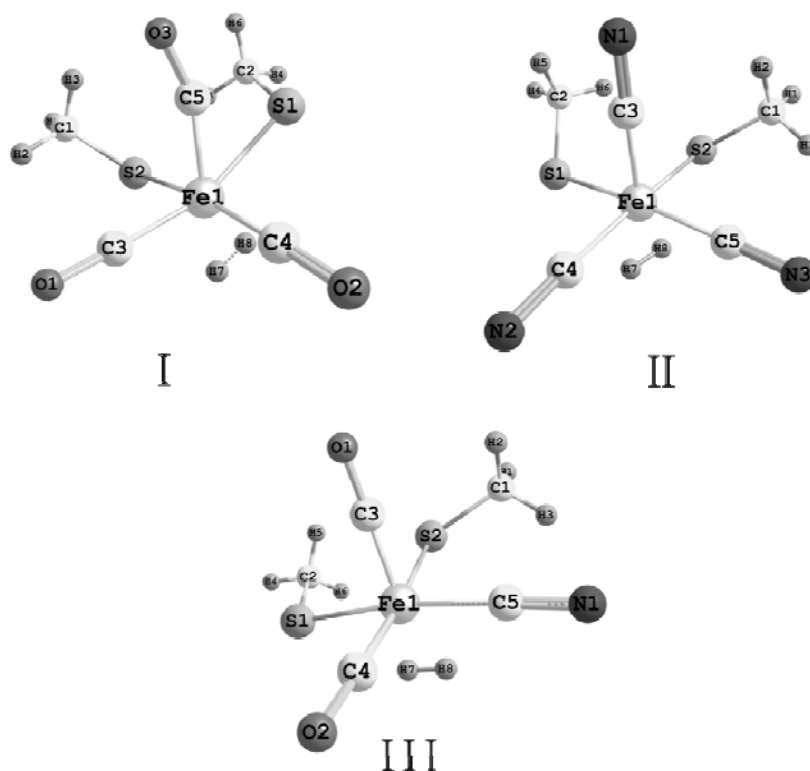


Рис. 2. Структуры половинной модели [NiFe]-гидрогеназы оптимизированные с помощью функционала PBE: I – $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_3]$, II – $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_3]^{3-}$, III – $[\text{FeCN}(\text{SCH}_3)_2(\text{CO})_2]^{1-}$

Таблица 4

Энергии связывания водорода с активным центром гидрогеназы и длины связи в зависимости от функционала в базисном наборе def2-tzvpd

Параметры	Геометрии		
	I	II	III
$E_b(\text{Fe-H}_2)$, ккал/моль	-9,3	0,4	-7,9
$r(\text{Fe-H7})$, Å	1,74	1,66	1,76
$r(\text{Fe-H8})$, Å	1,76	1,66	1,78
$r(\text{H7-H8})$, Å	0,81	0,84	0,81

Для всех структур атом железа находится в октаэдрическом поле лигандов. Оптимизация геометрий и расчет энергий связывания водорода проводились с использованием набора базисных функций def2-tzvpd, кроме того для получения наиболее точного значения энергии, были проведены расчеты энергии нулевых колебаний. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Структурам I и III соответствует отрицательная энергия связывания водорода с комплексом. Половинная модель активного центра [NiFe]-гидрогеназы, содержащая три цианидных лиганда характеризуется наибольшей энергией связывания, составляющей 0,4 ккал/моль. В сравнении со свободной молекулой водорода длина связи H7-H8 в комплексе увеличилась от 0,74 до 0,84 Å, что свидетельствует об образовании комплекса Кубаса. В связи с этим для модификации структурных аналогов активного центра [NiFe]-

гидрогеназы перспективным является замещение одного карбонильного лиганда на цианидный.

Таким образом, полученные данные могут быть использованы для изучения особенностей механизмов катализа водорода на моделях активных центров металлоэнзимов, содержащих атомы переходных элементов. Малое растяжение связи в молекуле водорода свидетельствует о преобладающем влиянии переноса электронной плотности с лиганда на металл. Несмотря на то, что оба лиганда и цианидный, и карбонильный относятся к лигандам сильного поля, комплекс состава $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_2(\text{CN})_3\text{H}_2]^{3-}$ характеризуется наиболее выгодной энергией связывания.

References

1. Mori K., Ogawa S., Martis Yamashita H. J. Phys. Chem. C. 2012, vol. 116, p. 18873–18877.

2. Khnayzer R. S., Thompson L. B., Zamkov M., Ardo S., Meyer G. J., Murphy C. J., Castellano F. N. J. *Phys. Chem. C*. 2012, vol. 116, p. 1429–1438.
3. Nelson D. L. Cox. M. M. *Lehninger principles of biochemistry*. New York. W. H. Freeman, 2008, 1294 p.
4. Brentner L. B., Peccia J., Zimmerman J. B. *Environ. Sci. Technol.* 2010, vol. 44, № 7, p. 2243–2254.
5. Fritsch J., Scheerer P., Frielingsdorf S., Kroschinsky S., Friedrich B., Lenz O., Spahn C.M.T. *Nature*. 2011, vol. 479, p. 249–252.
6. Lubitz W., Reijerse E., van Gestel M. *Chemical Reviews*. 2007, vol. 107, p. 4331–4365.
7. Volbeda A. Charon M. H., Piras C., Hatchikian E. C., Frey M., Fontecilla-Camps J. C. *Nature*. 1995, vol. 373, p. 580–587.
8. Tard C. et. all. *Nature*. 2005, vol. 433, p. 610–613.
9. Andreiadis E. S., Chavarot-Kerlidou M., Fontecave M., Artero V. *Photochem. & Photobiol.* 2011, 87, p. 946–964.
10. Ohki Y., Tatsumi K. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 2011, vol. 2011, p. 973–985.
11. Barton B. E., Olsen M. T., Rauchfuss T. B. *Current Opinion in Biotechnology*. 2010, vol. 21, p. 292–297.
12. Heinekey D. M. *Journal of Organometallic Chemistry*. 2009, vol. 694, p. 2671–2680.
13. Perdew J. P., Burke J., Ernzerhof M. *Phys. Rev. Lett.* 1996, vol. 77, p. 3865–3868.
14. Gordon M. S., Schmidt M. W. *Theory and applications of computational chemistry: the first forty years*. Elsevier. Amsterdam. 2005, p. 1167–1189.
15. Schmidt M. W., Baldridge K. K., Boatz J. A., Elbert S. T., Gordon M. S. *Journal of Computational Chemistry*. 1993, vol. 14, p. 1347–1363.
16. Grimme S., Antony J., Ehrlich S., Krieg H. *J. Chem. Phys.* 2010, vol. 132, 77, p. 1–19.
17. Piecuch P., Kucharski S.A., Kowalski K., Musial M. *Computer Physics Communications*. 2002, vol. 149, p. 71–96.

© Еремина А. Д., Кузубов А. А., Варганов С. А.,
Лыхин А. О., Сержантова М. В., 2013

УДК 621.454.2

НАНОМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Академгородок, 50/44
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: genry@icm.krasn.ru

Значительную долю массы ракеты занимает топливо, поэтому постоянно проводятся исследования по изысканию возможности уменьшения его объема. В этом плане одним из возможных направлений является применение металлов, среди которых высокой энергетической эффективностью обладает алюминий. При этом установлено, что более высокими «топливными» характеристиками обладают порошки алюминия с размерами частиц нанометрового диапазона по сравнению с крупнокристаллическим алюминием. Описана технология получения нанопорошкового алюминия методом электрического взрыва проводников. Высокая энергетическая эффективность нанопорошкового алюминия связана с возникновением в его частицах запасенной энергии. Применение нанопорошкового алюминия позволяет уменьшить массу топлива.

Ключевые слова: ракетное топливо, электрический взрыв проводников, нанопорошки алюминия.

NANOMETALLIC FUEL FOR THE ROCKET ENGINES

G. G. Krushenko

Institute of computational modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru

The fuel occupies a considerable part of the rocket mass, so researches for the possibility of its volume decrease are carrying out constantly. Therefore one of the possible ways is to use the metals among which aluminum is high energy effective. At the same time it is determined that aluminum powders with nanometer diapason particles possess higher fuel characteristics in comparison with macrocrystalline aluminum. The technology of obtaining the nanopowder aluminum by the method of electric explosion of the conductor is described. High energy effectiveness of nanopowder

aluminum connects with a rise of the accumulated energy in its particles. The use of nanopowder aluminum allows to decrease the fuel mass.

Keywords: rocket fuel, electricity explosion conductor, nanopowders aluminium.

В последнее время усилилось внимание к вопросу горения металлов в виде частиц наноразмерного диапазона, размеры которых не превышают 100 нм ($1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$), в связи с возможностью их использования в качестве топлива. Так, в работе [1] показана возможность создания новых высокоэффективных технических устройств, использующих горение расплывённых в активном газе порошков металлов, в ракетных двигательных установках. При этом большое количество публикаций посвящено энергетической эффективности порошкообразного алюминия в связи с возможностью его использования в виде одного из компонентов топлива двигательных установок. Например, в работе [2] представлен обзор 82 работ по вопросу горения порошкового алюминия, опубликованных в период с 1964 по 2000 гг., отдельный раздел посвящен обзору работ в этой области, выполненных российскими исследователями. Еще более подробный обзор (206 публикаций в период с 1958 по 2008 гг.) по этой проблеме представлен в недавней работе [3]. При этом в большинстве ранних работ описывается применение микронных частиц алюминия, например в [4], тогда как существенно более высокая энергетическая эффективность алюминия в виде частиц нанометрового диапазона была установлена экспериментально еще в 70-е гг. прошлого столетия сотрудниками НИИ высоких напряжений Томского политехнического института [5].

Следует при этом отметить, что на уникальность свойств частиц веществ с малыми размерами еще в 1847 г. обратил внимание Майкл Фарадей при проведении исследований с золями золота (gold sols) [6]: золь представляет собой высокодисперсную систему с жидкой дисперсионной средой, размеры дисперсных частиц которой лежат в пределах от 1 до 100 нм. Кроме того, в его работах описано получение частиц металлов путем пропускания импульсов электрического тока при разрядке конденсаторов, т. е. Фарадей фактически работал с наносистемами, специфическим свойствам которых только в последние годы стали уделять большое внимание [7; 8], включая и интерес к новому классу материалов – ультрадисперсным порошкам (принятое в настоящее время название – нанопорошки – НП) [9–11], которые представляют собой тонкодисперсные сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм [12].

Повышенный интерес к этим материалам нанометрового диапазона объясняется тем, что они обладают уникальными физико-химическими свойствами, существенно отличающимися от свойств материалов того же химического состава в массивном состоянии. Например, наночастицы такого инертного материала, как золото, в виде частиц размером 1–5 нм становятся превосходным катализатором [13].

Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и объеме оказывается соизмеримым [12]. Ввиду того, что атомы на поверхности наночастиц имеют соседей только с одной стороны, их равновесие нарушается и происходит структурная релаксация, которая приводит к смещению межатомного расстояния в слое толщиной в 2–3 нм. Поэтому ультрадисперсные частицы имеют существенно искаженную кристаллическую решетку, что влияет на энергию активации большинства процессов, в которых они участвуют, меняя их привычный ход и последовательность [14].

Наиболее характерной особенностью НП металлов являются большая площадь поверхности их частиц и запасенная в них энергия, с чем связана их более низкая температура плавления и высокая каталитическая активность, обеспечивающие более низкую температуру воспламенения по сравнению с крупными частицами металлов [3].

Исследование, проведенное с применением метода молекулярно-динамического моделирования [15], показало, что температура плавления наночастиц алюминия с размером 1 нм может быть на 400 К ниже температуры плавления массивного образца (933 К).

Нанотехнология коснулась и ракетно-космической техники, одним из важнейших составляющих которой является такой компонент, как топливо. Идея использования в качестве горючего для двигателя космической ракеты металлов – веществ, обладающих высокой теплотворной способностью, была впервые высказана еще в 40-х гг. XX в. Ф. А. Цандером – крупнейшим теоретиком в области ракетостроения [16]. Однако известно, что продукты сгорания металлов – частицы окислов – не являются молекулами и потому не могут обладать такими высокими молекулярными скоростями, как частицы газов. Поэтому они не могут служить источником реактивной силы, т. е. в чистом виде металлы не годятся в качестве топлива для ракеты. Но если сжигать в двигателе ракеты обычное жидкое топливо, к которому примешаны частицы металла (суспензии), то теплота, развитая твердыми частицами, перейдет к газообразным продуктам горения и температура газа вследствие этого существенно увеличится; возрастут и скорости истечения продуктов сгорания, а следовательно, удельная тяга двигателя станет больше.

В работе [17] констатируется, что наноразмерный алюминий применяется в качестве ракетного топлива в связи с его высокими энергетическими характеристиками, причем наиболее высокими показателями обладают наночастицы размером 80 нм. Однако при этом отмечается, что при контакте с воздушной средой по причине высокой электроположительности на поверхности частиц алюминия образуется прочный тугоплавкий слой оксида алюминия Al_2O_3 , снижаю-

щий его реакционную способность. В работе описан метод химического модифицирования окисленных наночастиц алюминия с применением оксидов висмута Bi_2O_3 и меди Cu_2O , что повышает их эффективность.

Целесообразность применения металлического топлива, по идее Ф. А. Цандера, обоснованная расчетами, заключается, во-первых, в том, что оно может быть использовано для увеличения скорости истечения продуктов сгорания жидкого топлива в результате его совместного сжигания с металлами, обладающими высокой теплотворной способностью, такими, например, как Al, Mg, Li, Be (см. таблицу) и др., в виде коллоидного раствора металла (или в виде пыли) в жидком топливе. Распыливание жидкого металла может быть произведено при помощи газа-распылителя, в качестве которого могут служить воздух или кислород. Во-вторых, с целью увеличения весового содержания горючего в ракете Ф. А. Цандер считал возможным использовать в качестве топлива металлические компоненты ее конструкции после их отработки, в результате чего суммарное количество горючего в ракете может составлять до 90 % от ее начальной массы, что позволило бы осуществлять полеты на значительную высоту. Кроме того, в работе [18] предлагается 14 различных металлических топливных смесей, в состав девяти из которых входит Al, в 10 – Mg; в шести составах присутствуют оба компонента. Среди других металлов теплотворная способность и скорость истечения из сопла продуктов сгорания алюминия, хотя и уступают таковым для лития и бериллия (см. таблицу), но его содержание в земной коре и ежегодное производство несоизмеримо их превосходят, что и определяет перспективность применения алюминия. Кроме того, постоянно ведутся исследования по разработке оптимальных сочетаний компонентов топлив и дисперсности алюминия, в результате которых можно ожидать повышения этих показателей.

Но осуществление идеи Ф. А. Цандера при существующем в то время состоянии производства не представлялось возможным.

Не ставя перед собой задачу развития этого направления, в 70-х гг. XX в. сотрудник НИИ высоких напряжений Томского политехнического института Н. А. Яворовский с коллегами начал заниматься электрическим взрывом проводников (ЭВП) [5] при исследовании работы так называемых взрывных прерывателей. Во время проведения экспериментов с прерывателями (в изолированной камере, наполненной аргоном, электрическим импульсом взрывали алюминиевый провод) в продуктах взрыва были обнаружены идеально шарообразные частицы алюминия величиной примерно 20 нм. В то время за ними закрепилось название «ультрадисперсные порошки». Последующие исследования показали их исключительно высокую химическую активность.

Результаты сравнительных испытаний НП алюминия и промышленного микропорошка алюминия с размером частиц около 20 мкм, который широко используется для улучшения энергомассовых и баллистических характеристик высокоэнергетических кон-

денсированных систем, в том числе ракетных топлив, показали [5], что для НП алюминия экзотермический процесс начинается ниже его температуры плавления. Кроме того, при сгорании в воздушной ударной трубе НП алюминия имел задержку возгорания только 3 м/с по сравнению с задержкой в 600 м/с для алюминиевого порошка со средним диаметром частиц 3 мкм. В смесях с окислителями НП алюминия показал увеличение скорости детонации от 4 380 до 5 070 м/с, тогда как добавка крупнодисперсного порошка не оказала заметного влияния на эту характеристику. При замене микропорошка алюминия нанопорошком для ряда составов рост скорости детонации составил 200–300 м/с, а также в ряде зарядов было отмечено возрастание брызгантности до 27 %.

Авторы работ по получению НП алюминия методом ЭВП объясняют эти эффекты тем, что такие порошки обладают так называемой запасенной энергией, накапливающейся в двойном электрическом слое, сформировавшемся в процессе образования наночастиц и последующем их окислении. Для частиц нанопорошков, размер которых приблизительно 50 нм, вклад энергии поверхности в суммарную запасенную энергию составляет 2–4 кДж/моль. Эффект запасенной энергии известный специалист в области технологии ЭВП А. П. Ильин объясняет тем, что на стадии охлаждения порошков с высокой скоростью (10^{10} К/с) не происходит их полная релаксация, и часть введенной энергии «затормаживается» в виде запасенной избыточной энергии поверхности, внутренних дефектов и зарядовых состояний [19]. С помощью дифференциального термического анализа и метода растворяющей калориметрии было установлено, что величина запасенной энергии в несколько раз превышает теплоту плавления того же вещества в массивном состоянии.

Эффект запасенной энергии можно хорошо проиллюстрировать результатами нашего исследования при применении порошка двуокиси титана TiO_2 в качестве зародышеобразующего агента (модификатора), вводимого в алюминиевые сплавы с целью измельчения структуры литых изделий. Так, для получения практически одинакового эффекта измельчения структуры металла требуется до 0,5 % технической двуокиси титана (размеры частиц – микрометры), тогда как нанопорошка двуокиси – не более 0,005 % (в 100 раз меньше), что установлено с применением метода планирования эксперимента. Этот эффект можно объяснить ссылками на работу [20], в которой установлено, что площадь поверхности нанокристаллической двуокиси титана значительно превышает таковую для крупнокристаллической двуокиси, а следовательно, нанокристаллическая модификация обладает значительно большей запасенной энергией, чем крупнокристаллическая.

Следует отметить, что эффект получения металлических частиц в результате электрического взрыва проводников (в виде бронзовых шаров) был обнаружен еще в 80-е годы XVIII столетия английским физиком Э. Наирне (Edward Nairne) [21]. Э. Наирне назвал эти частицы *artificial cloud* – искусственное облако, которое,

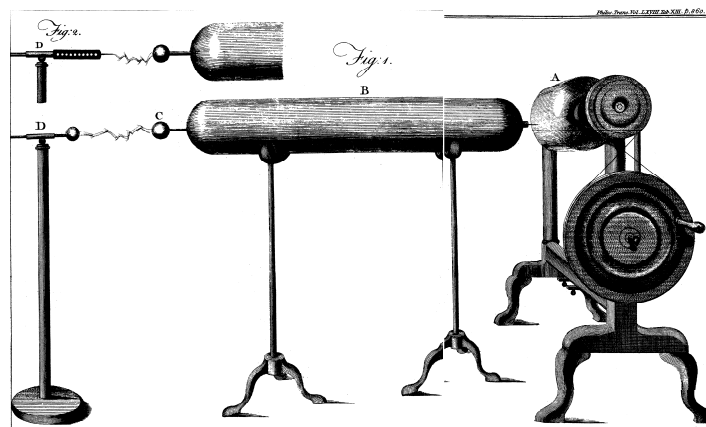
очевидно, состояло из частиц бронзы. На рисунке представлена схема экспериментальной установки.

Таким образом, результаты приведенных исследований показывают более высокую энергетическую эффективность нанопорошкового алюминия, полу-

ченного методом электрического взрыва проводников, по сравнению с крупнокристаллическим порошком, что позволяет его использовать в качестве высокоэнергетического топлива для ракетных двигателей.

Сравнительные данные топливных материалов

Горючее	Теплотворная способность смеси, кал/кг	Теоретическая скорость истечения из сопла, м/с	Содержание в земной коре, масс. %	Мировое производство	Стоимость 1 кг., \$
Водород	3 240	5 170	1,00	2005 г. – 50 млн т.	Среднегодовая – 2-5
Mg	3 600	5 500	2,76	2006 г. – 700 тыс. т	2013 г. – 5,273
Al	3 700	5 560	5,50	2012 г. – 48,8 млн т.	2013 г. – 17,73
Li	4 780	6 330	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Среднегодовое 13 000 – 14 000 т.	2013 г. – 45,64
Be	5 430	6 750	$6 \cdot 10^{-4}$	2011 г – 240 т.	2013 г – 800



Экспериментальная установка Е. Nairne, предназначенная для электрического взрыва проводников [21]: *A* – стеклянный цилиндр $\varnothing$ 18 дюймов (457,2 мм); *B* – проводник в виде деревянного стержня, плакированного оловянной фольгой, длиной 6 футов (1828,8 мм), $\varnothing$ 1 фут (304,8 мм), к концу которого прикреплен бронзовый шар *C* $\varnothing$ 4,5 дюйма (114,3 мм); *D* – бронзовый пруток, плакированный оловянной фольгой, к концу которого прикреплялись другие прутки, к которым прикреплялись бронзовые шарики. В результате передачи электрического заряда, накопленного на стеклянном цилиндре *A*, проводнику *B*, между шаром *C* и шаром на конце прутка *D* проскакивала «молния» (*lightning*), в результате чего возникало *artificial cloud* (искусственное облако), очевидно, состоящее из частиц бронзы

Библиографические ссылки

1. Малинин В. И., Бульбович Р. В. Перспективы применения металлических горючих в двигательных установках космических летательных аппаратов // XXV Рос. шк. по проблемам науки и технологий : сб. науч. тр. Екатеринбург : УрО РАН, 2005. С. 382–384.
2. Beckstead M. W. A Summary of Aluminum Combustion. Published in The Research and Technology Organisation of NATO-EN-023, Rhode-Saint-Genèse, Belgium 2002. 46 p.
3. Richard A. Yetter, Grant A. Risha, Steven F. Son Metal particle combustion and nanotechnology // Proceedings of the Combustion Institute, 2009. Vol. 32, Issue 2. P. 1819–1838.
4. Brooks K. P., Beckstead M. W. Dynamics of aluminium combustion // Journal of propulsion and power, 1995. Vol. 1, № 4. P. 769–780.
5. Котов Ю. А., Яворовский Н. А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24–28.
6. Faraday M. The Bakerian lecture: experimental relations of gold (and other metals) to light // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1847. Vol. 147. P. 145–181.
7. Третьяков Ю. Д. Нанонаука, нанотехнология и nanoиндустрия – тенденции развития // Нанотехнологии функциональных материалов : тр. I Междунар. науч.-техн. конф. СПб : СПб ГПУ, 2010. С. 37–40.
8. Горынин И. В. Наноструктурированные материалы – прорывное направление развития металлургии // Нанотехнологии функциональных материалов : I Междунар. науч.-техн. конф. СПб : СПб ГПУ, 2010. С. 41–42.
9. Упрочнение металлических, полимерных и эластомерных материалов ультрадисперсными порошками

ми плазмохимического синтеза / М. Ф. Жуков, И. Н. Черский, А. Н. Черепанов, Г. Г. Крушенко и др. Новосибирск : Наука ; Сиб. издат. фирма РАН, 1999. 312 с.

10. Крушенко Г. Г. Нанотехнологии в конструкционных сплавах // V Ставеровские чтения : тр. науч.-техн. конф. «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение». Красноярск : Сиб. федер. ун-т ; КНЦ СО РАН, 2009. С. 268–272.

11. Крушенко Г. Г. «Порошковые технологии» в металлургическом машиностроении // Тяжелое машиностроение. 2010. № 3. С. 27–30.

12. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.

13. Supported gold nanoparticles: in-depth catalyst characterization and application in hydrogenation and oxidation reactions / Schimpf S. et al. // *Catalysis today*, 15 February 2002. Vol. 72, Issues 1–2. P. 63–78.

14. Зубов В. И. Об особенностях термодинамики ультрадисперсных систем // Физикохимия ультрадисперсных систем : материалы IV Всерос. конф. М. : МИФИ, 1998. С. 23–26.

15. Alavi S., Thompson D. L. Molecular dynamics simulations of the melting of aluminum nanoparticles // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2006. Vol. 110, Issue 4. P. 1518–1523.

16. Цандер Ф. А. Применение металлического топлива в ракетных двигателях // Ракетная техника, 1936. № 1. С. 174–194.

17. A12-012 TITLE Energetic Modification of Aluminum Nanoparticles // ARMY. 12.1 Small Business Innovation Research (SBIR). P. 26–27.

18. Цандер Ф. А. Вопросы конструирования ракеты, использующей металлическое топливо. М. : ОНТИ НКТП СССР, 1936. С. 91–115.

19. Ильин А. П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом электрического взрыва проволок // Физика и химия обработки материалов, 1994. № 3. С. 94–97.

20. X-ray absorption reveals surface structure of titanium dioxide nanoparticles / L. X. Chen, T. Rajh, W. Jager et al. // *Journal of synchrotron radiation*, 1999. Vol. 6. Issue 3. P. 445–447.

21. By Mr. Edward Nairne, F. R. S. Experiments on electricity, being an attempt to shew the advantage of elevated pointed conductors // *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1778. Vol. 68, no. 0. P. 823–860.

References

1. Malinin V. I., Bulbovich R. V. [Prospects for the use of metal in gryuchih propulsion spacecraft] *XXV Rossiiskaya shkola po problemam nauki i tehnologii* [XXV Ros. wk. on Science and Technology]. Ekaterinburg, 2005, p. 382–384. (In Russian)

2. Beckstead M. W. A Summary of Aluminum Combustion.- published in The Research and Technology

Organisation of NATO-EN-023, Rhode-Saint-Genèse, Belgium 2002, 46 p.

3. Richard A. Yetter, Grant A. Risha, Steven F. Son Metal particle combustion and nanotechnology. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, vol. 32, Issue 2, p. 1819–1838.

4. Brooks K. P., Beckstead M. W. Dynamics of aluminium combustion. *Journal of propulsion and power*, 1995, vol. 1, № 4, p. 769–780.

5. Kotov Yu. A., Yavorovskii N. A. *Phizika i khimiya obrabotki materialov*, 1978, no. 4, p. 24–28.

6. Faraday M. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1847, vol. 147, p. 145–181.

7. Tretyakov Yu. D. [Nanoscience, nanotechnology and nano-industry – trends]. *Tr. I Mezhdunarodnaya nauchno-technicheskaya konferenciya “Nanotehnologii funkcionalnih materialov”* [Tr. I Intern. scientific and engineering. Conf “Nano Functional Materials.”]. St. Petersburg, 2010, pp. 37–40. (In Russian)

8. Gorinin I. V. [Nanostructured materials – cutting-edge area of metallurgy]. *Tr. I Mezhdunarodnaya nauchno-technicheskaya konferenciya “Nanotehnologii funkcionalnih materialov”* [Tr. I Intern. scientific and engineering. Conf “Nano Functional Materials.”]. St. Petersburg, 2010, pp. 41–42.

9. Zhukov M. F., Cherskii I. N., Cherepanof A. N., Krushenko G. G. et al. *Uprochnenie metallicheskih, polimernih i elastomernih materialov ultradispersnimi poroshkami plazmokhimicheskogo sinteza* (Hardening of metal, plastic and elastomeric materials ultrafine powders plasma synthesis). Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya izdatelskaya firma RAN, 1999, 312 p.

10. Krushenko G. G. [Nanotechnology in structural alloys]. *V Staverovskie chteniya. Tr. Nauch.-techn. konf. “Ultradispersnii poroshki, nanostrukturni, materiali: poluchenie, svoistva, primeneniye”* [V Staverovskie read: tr. scientific and engineering. Conf. “Ultrafine Powders, Nanostructures, Materials: Preparation, Properties, Applications”]. Krasnoyarsk, SFU, KNC, 2009, pp. 268–272. (In Russian)

11. Krushenko G. G. *Tyazholoe mashinostroenie*. 2010, no. 3, p. 27–30.

12. Morohov I. D., Trusov L. I., Chizhik S. P. *Ultradispersnie metallicheskie sredi* (Ultra-fine metal environment). Moscow, Atomizdat, 1977, 264 p.

13. Schimpf S. et al. Supported gold nanoparticles: in-depth catalyst characterization and application in hydrogenation and oxidation reactions. *Catalysis today*, 15 February 2002, vol. 72, Issues 1–2, p. 63–78.

14. Zubov V. I. [About the features of the thermodynamics of systems of ultrafine]. *Materiali IV Vseros. Konf. “Fisiko-khimiya ultradispersnih sistem”* [Proceedings of IV All-Russia. Conf. “Physical chemistry ultrafine Systems”]. Moscow, MIFI, 1998, pp. 23–26. (In Russian)

15. Alavi S., Thompson D. L. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2006, vol. 110, Issue 4, p. 1518–1523.

16. Cander F. A. *Raketnaya tehnika*. 1936, no. 1, p. 174–194.

17. A12-012 TITLE. ARMY. 12.1 Small Business Innovation Research (SBIR). P. 26–27.

18. Cander F. A. *Voprosy konstruirovaniya rakety, ispol'zuyushchey metallicheskiye toplivo* (Constructing a rocket that uses metallic fuel). Moscow, ONTI NKTP SSSR, 1936, p. 91–115.

19. Ilin A. P. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1994, no. 3, p. 94–97.

20. Chen L. X. et al. *Journal of synchrotron radiation*. 1999, vol. 6, Issue 3, p. 445–447.

21. Nairne E. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. 1778, vol. 68, no. 0, p. 823–860.

© Крушенко Г. Г., 2013

УДК 544.18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕТОДА САМОСОГЛАСОВАННОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ МЕТАЛЛОПРОТЕИНОВ*

А. О. Лыхин^{1,2}, А. А. Кузубов^{1,2}, С. А. Варганов¹, М. В. Сержантова¹, Н. С. Елисеева^{1,2}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru

В рамках метода многоконfigurационного самосогласованного поля с полным и ограниченным активным пространством рассмотрено электронное строение окисленной формы модели активного центра рубредоксина $[Fe(SCH_3)_4]^+$. Результаты исследования показывают применимость метода RASSCF для описания комплекса. Определено активное пространство, позволяющее наиболее точно описывать статическую корреляцию электронов. Многоконfigurационный характер электронных волновых функций существенно проявляется при использовании двух наборов молекулярных орбиталей – пяти чистых 3d-орбиталей Fe и трех смешанных 3d-орбиталей Fe с p-орбиталями атомов S. Используя данное активное пространство, можно исследовать электронную структуру бинадерных комплексов методом RASSCF.

Ключевые слова: рубредоксин, метод многоконfigurационного самосогласованного поля, теория функционала плотности.

THE CHOICE OF THE ACTIVE SPACE FOR MULTICONFIGURATIONAL SELF-CONSISTENT-FIELD IN THE DESCRIPTION OF THE METALLOPROTEINES ACTIVE SITES

A. O. Lykhin^{1,2}, A. A. Kuzubov^{1,2}, S. A. Varganov¹, M. V. Serzhantova¹, N. S. Eliseeva^{1,2}

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru

The article considers the electronic structure of oxidized state of the cluster $[Fe(SCH_3)_4]^+$ which is an analog of the active site in rubredoxin proteins, in the framework of multiconfigurational self-consistent-field with complete and restriction active space. Our results show the applicability of the restriction active space to metal complex. The active space with the most accurate description of the static electron correlation is defined. The multireference character of the electronic wavefunctions is achieved by using two sets of molecular orbitals. The first set is five pure 3d-orbitals of Fe and the second three mixed molecular orbitals, which are linear combination of iron 3d-orbitals and sulfur p-orbitals. Based on RASSCF wavefunctions and this choice of the active space it is possible to describe binuclear metal complexes.

Keywords: rubredoxin, complete active space self-consistent field (CASSCF), density functional theory (DFT).

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0916.

Комплексы переходных металлов могут находиться в различных спиновых состояниях, что обуславливает их распространенность в неадиабатических процессах [1; 2]. Такие методы, как теория возмущения, теория функционала плотности (DFT), широко применяемые при изучении соединений переходных металлов, относятся к однодетерминантным, в то время как для корректного описания подобных систем требуются более гибкие многоконфигурационные методы.

Фундаментальной проблемой при описании активных центров металлопротеинов, методом многоконфигурационного самосогласованного поля с полным активным пространством (CASSCF) является выбор активного конфигурационного пространства [3]. Малое активное пространство приводит к неполному описанию статической корреляции электронов. Его расширение за счет включения занятых и вакантных молекулярных орбиталей приводит к существенному росту числа детерминантов, определяющих волновую функцию системы, что обуславливает высокие затраты компьютерных ресурсов. Одним из возможных подходов к сокращению количества детерминантов в методе MCSCF является выделение подпространств молекулярных орбиталей и ограничение возбуждений электронов в рамках этих подпространств (RASSCF) [4]. Метод RASSCF позволяет увеличить общее количество молекулярных орбиталей, включенных в активное пространство, в сравнении с CASSCF, что представляет интерес с позиции использования его в *ab initio* расчетах биядерных комплексов переходных металлов, часто играющих роль активных центров различных металлопротеинов.

Конформеры аниона $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_4]^-$ в дублетном и секстетном спиновых состояниях, обладающие симметрией точечной группы D_{2d} и S_4 , были предварительно оптимизированы в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием обменно-корреляционного функционала PBE [5] и базисного набора def-TZVP [6]. Оптимизация проводилась в квантово-химическом пакете GAMESS [7; 8] с использованием стандартных критериев сходимости и пространственной сетки интегрирования Лебедева, содержащей 96 радиальных оболочек с 302 угловыми точками на каждую оболочку. Выбор симметрии конформеров был обусловлен кристаллографическими исследованиями, согласно которым конформер симметрии S_4 обнаружен в аналоге рубредоксина $[\text{Et}_4\text{N}][\text{Fe}(\text{SCH}_3)_4]$ [9], а конформер симметрии D_{2d} является хорошим приближением к геометрии активного центра рубредоксина непосредственно в самом белке [10]. Незначительные различия в относительной энергии конформеров $[\text{Fe}(\text{SCH}_3)_4]$, оптимизированных с наложением ограничений по симметрии и без них (табл. 1), позволяют использовать элементы симметрии при рассмотрении электронной структуры комплекса в рамках многоконфигурационных квантово-химических методов (MCSCF).

Равновесная геометрия высокоспинового (секстетного) состояния с симметрией D_{2d} характеризуется тетраэдрическим окружением для атома железа. При оптимизации низкоспинового (дублетного) состояния

той же симметрии были получены два конформера, в одном из которых атом железа находится в плоско-квадратном окружении атомов серы, а в другом, лежащем на 34,7 ккал/моль ниже по энергии, он находится в поле лигандов с искаженной тетраэдрической координацией. По этой причине в дальнейших расчетах был использован конформер с искаженным тетраэдрическим окружением атома железа. Геометрические различия между энергетически наиболее выгодными дублетным и секстетным конформерами симметрии D_{2d} достаточно малы и связаны с изменением положения атомов S относительно комплексобразующего атома при сохранении положения метильных групп. Переход между конформерами осуществляется благодаря колебанию с частотой 668 см^{-1} , в результате которого происходит изменение спинового состояния системы, поэтому формально он относится к спин-запрещенному. В этой связи для рассмотрения электронной структуры комплекса и учета статической корреляции электронов были использованы методы CASSCF и RASSCF с учетом двойных возбуждений.

Таблица 1

Относительные энергии оптимизированных структур

Точечная группа симметрии	Конформер в секстетном спиновом состоянии, ккал/моль	Конформер в дублетном спиновом состоянии, ккал/моль
C_1	0,1	1,3
S_4	0	–
D_{2d}	1,0	4,8
D_{2d} (квадрат)	–	39,5

Для сравнения точности методов CASSCF и RASSCF были проведены расчеты высокоспинового и низкоспинового состояний для равновесной геометрии комплекса симметрии D_{2d} , полученной при оптимизации секстета. В качестве исходных молекулярных орбиталей (МО) для формирования активного пространства были использованы натуральные орбитали, полученные после проведения расчета в точке методом теории возмущения Мёллера–Плессета (MP2). Активное пространство, состоящее из трех подпространств МО, включало пять орбиталей, представленных 3d-орбиталями Fe(III), а также четыре $\sigma_{\text{св}}$ и четыре σ^* -орбитали лигандов. На рис. 1 представлены оптимизированные орбитали активного пространства. В методе CASSCF рассматривались все возможные возбуждения электронов, в то время как в RASSCF – только возбуждения между подпространствами МО. Симметрия электронного состояния задавалась точечной группой D_2 . В табл. 2 и 3 представлены числа заполнения орбиталей активного пространства дублетного и секстетного состояний.

Заполнение вакантных σ^* -орбиталей лигандов достаточно мало, что вместе с отсутствием вкладов в общую волновую функцию от детерминантов с за-

полненными σ^* -орбиталями лигандов (табл. 4) позволяет сделать вывод, что включение данных орбиталей в активное пространство не является целесообразным

для описания многоконфигурационного характера системы.

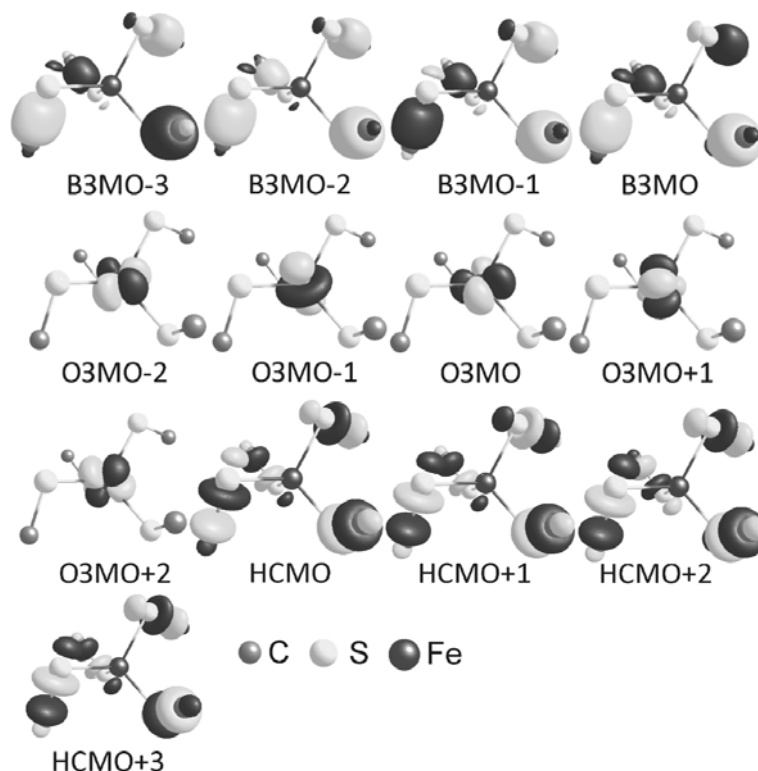


Рис. 1. Оптимизированные орбитали активного пространства конформера симметрии D_{2d} в секстетном спиновом состоянии

Таблица 2

Числа заполнения орбиталей активного пространства для секстетного состояния

МО	MP2	Электронный терм в методе CASSCF				Электронный терм в методе RASSCF
		A	B ₁	B ₂	B ₃	A
V3MO-3	1,943	1,976	1,992	1,992	1,991	1,979
V3MO-2	1,942	1,976	1,992	1,992	1,991	1,979
V3MO-1	1,94	1,975	1,991	1,991	1,991	1,978
V3MO	1,94	1,975	1,987	1,987	1,987	1,978
O3MO-2	0,995	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O3MO-1	0,987	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O3MO	0,985	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O3MO+1	0,985	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
O3MO+2	0,985	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
H3CMO	0,038	0,025	0,013	0,013	0,013	0,022
H3CMO+1	0,038	0,025	0,009	0,009	0,009	0,022
H3CMO+2	0,037	0,024	0,008	0,008	0,009	0,022
H3CMO+3	0,037	0,024	0,008	0,008	0,009	0,022

Данное обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что в отличие от цианидных лигандов, тиометильные группы относятся к лигандам слабого поля и участие $\sigma_{\text{св}}$ -орбиталей в связывании с металлом несущественно. С другой стороны, включение молекулярных орбиталей (МО) с максимальным вкладом 3d-орбиталей представляется чрезвычайно важным, поскольку эти орбитали являются частично заполненными и необходимы для корректного описания многодетерминантной волновой функции комплекса, в особенности в случае дублетного состояния, когда числа заполнения вакантных d-орбиталей достигают значительных величин, равных 0,08.

Терм симметрии А является наиболее выгодным электронным термом для обоих спиновых состояний. Разница по энергии между основным секстетным и возбужденным дублетным состояниями, предсказан-

ная методом CASSCF, отличается менее чем на 0,01 ккал/моль от результатов метода RASSCF. Вместе с тем при оптимизации орбиталей оба метода также дают одинаковый набор молекулярных орбиталей. Данный факт указывает на возможность использования волновой функции метода RASSCF в качестве ссылочной вместо волновой функции CASSCF при проведении дальнейших расчетов, основанных на теории возмущения.

Для формирования второго активного пространства, позволяющего представить волновую функцию в виде линейной комбинации детерминантов, полученных путем возбуждения электронов с дважды занятых на вакантные и частично занятые орбитали, были рассмотрены как чистые 3d-орбитали железа, так и три смешанные 3d-Fe и 3p-орбитали S (ВЗМО-2, ВЗМО-1, ВЗМО) (рис. 2, табл. 5).

Таблица 3

Числа заполнения орбиталей активного пространства для дублетного состояния

МО	Электронный терм в методе CASSCF				Электронный терм в методе RASSCF
	A	B ₁	B ₂	B ₃	A
ВЗМО-5	1,976	1,979	1,979	1,985	1,976
ВЗМО-4	1,975	1,976	1,976	1,976	1,975
ВЗМО-3	1,975	1,975	1,975	1,975	1,975
ВЗМО-2	1,975	1,975	1,975	1,975	1,975
ВЗМО-1	1,918	1,975	1,975	1,975	1,918
ВЗМО	1,729	1,900	1,900	1,889	1,729
ОЗМО	0,977	0,956	0,956	0,955	0,977
НСМО	0,188	0,084	0,084	0,086	0,188
НСМО+1	0,188	0,082	0,082	0,086	0,188
НСМО+2	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
НСМО+3	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
НСМО+4	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
НСМО+5	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024

Таблица 4

Коэффициенты конфигурационного взаимодействия метода CASSCF

МО	$\sigma_{\text{св}}$ -орбитали				3d-орбитали					σ^* -орбитали				Коэффициенты
Конфигурации секстета	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0,96
	1	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0,11
Конфигурации дублета	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0,88
	2	2	2	2	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0,18
	2	2	2	2	2	0	1	0	2	0	0	0	0	0,18
	2	2	2	2	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0,17

Примечание. В табл. 4 отброшены коэффициенты конфигурационного взаимодействия меньше 0,1.

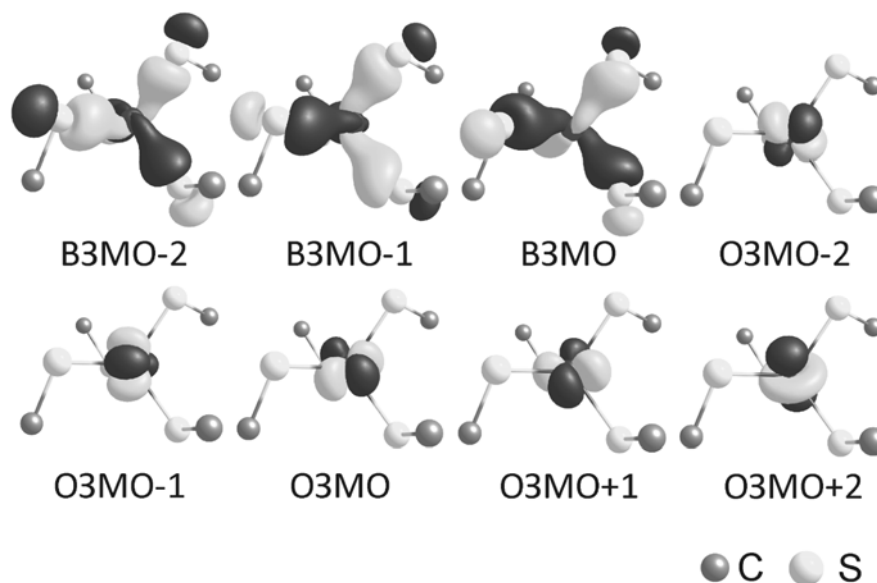


Рис. 2. Оптимизированные орбитали второго активного пространства конформера симметрии D_{2d} в секстетном спиновом состоянии

Таблица 5

Коэффициенты конфигурационного взаимодействия метода CASSCF

МО	Смешанные 3d- и 3p-орбитали			3d-орбитали					Коэффициенты
Конфигурации секстета	2	2	2	1	1	1	1	1	0,70
	1	2	2	1	1	1	1	2	-0,38
	2	1	2	1	1	1	2	1	0,38
	2	2	1	1	1	2	1	1	-0,37
	1	2	1	1	1	2	1	2	0,16
	2	1	1	1	1	2	2	1	-0,16
	1	1	2	1	1	1	2	2	-0,16
Конфигурации дублета	2	2	2	2	2	1	0	0	0,87
	2	2	1	2	2	1	0	1	-0,17
	2	2	2	1	2	1	1	0	0,17
	2	2	0	2	2	1	0	2	0,13
	2	2	2	0	2	1	2	0	0,13
	2	2	1	1	2	1	1	1	-0,11
	2	2	1	1	2	1	1	1	-0,11
	2	2	1	1	2	1	1	1	0,11

Примечание. В табл. 5 отброшены коэффициенты конфигурационного взаимодействия меньше 0,1.

Очевидно, что включение дополнительных смешанных орбиталей приводит к увеличению числа детерминантов, описывающих волновую функцию системы. Величина коэффициентов конфигурационного взаимодействия метода CASSCF указывает на весомый вклад возбужденных детерминантов, получен-

ных за счет переноса электронов со смешанных орбиталей на чистые 3d-орбитали. В свою очередь, расширение активного пространства за счет включения смешанных e_g -орбиталей не оказывает существенного влияния на многоконфигурационный характер волновой функции, поскольку при оптимизации электрон-

ного состояния данные орбитали покидают активное пространство, занимая более низкое положение по энергии. Рассмотренный подход позволяет учесть перенос электронной плотности между комплексообразующим атомом и лигандами, играющий важнейшую роль при формировании дативных связей. Таким образом, при проведении дальнейших расчетов в рамках многоконфигурационных теорий возмущения, использующих волновую функцию метода CASSCF в качестве реферной, наиболее точные результаты могут быть получены путем формирования активного пространства из пяти чистых 3d-орбиталей Fe и трех дополнительных смешанных орбиталей, каждая из которых является линейной комбинацией 3p-орбиталей S и одной из орбиталей d_{xy} , d_{xz} или d_{yz} атома Fe.

References

1. Schröder D., Shaik S., Schwarz H. *Accounts of Chemical Research*. 2000, vol. 33, № 3, p. 139–145.

2. Scheidt W. R., Reed C. A. *Chemical Reviews*. 1981, vol. 81, № 6, p. 543–555.

3. Schmidt M. W., Gordon M. S. *Annual Review of Physical Chemistry*. 1998, vol. 49, p. 233–266.

4. Ivanic J. *The Journal of Chemical Physics*. 2003, vol. 119, № 18, p. 9364.

5. Perdew J., Burke K., Ernzerhof M. *Physical Review Letters*. 1996, vol. 77, № 18, p. 3865–3868.

6. Weigend F., Ahlrichs R. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2005, vol. 7, № 18, p. 3297–3305.

7. Gordon M. S., Schmidt M. W. *Theory and applications of computational chemistry: the first forty years*. Amsterdam, Elsevier, 2005, p. 1167–1189.

8. Schmidt M. W. et al. *Journal of Computational Chemistry*. 1993, vol. 14, № 11, p. 1347–1363.

9. Maelia L. E., Millar M., Koch S. A. *Inorganic Chemistry*. 1992, vol. 31, № 22, p. 4594–4600.

10. Min T. et al. *Protein Science*. 2001, vol. 10, № 3, p. 613–621.

© Лыхин А. О., Кузубов А. А., Варганов С. А., Сержантова М. В., Елисева Н. С., 2013

УДК 539.234

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ РАДИООТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ*

А. Е. Михеев¹, А. В. Гирн¹, В. А. Харламов², А. А. Чернятина², И. И. Хоменко¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: michla@mail.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662971, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Разработана технология напыления многослойного радиоотражающего покрытия методом магнетронно-го распыления. Представлены результаты процесса подготовки поверхности под нанесение покрытий, результаты измерения скорости осаждения слоев SiO₂ и Al, удельного сопротивления алюминиевой пленки в зависимости от условий и режимов напыления. Установлены основные технологические режимы напыления всех слоев покрытия.

Ключевые слова: радиоотражающие покрытия, вакуумное нанесение покрытий, плазмобразующий газ.

THE DEVELOPMENT OF THE COATINGS TECHNOLOGY APPLICATION RADIOREFLECTIVE COATINGS

A. E. Miheev¹, A. V. Girn¹, V. A. Harlamov², A. A. Chernyatina², I. I. Homenko¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: michla@mail.ru

²JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

The multi-layer coating technology of radioreflexive coating by magnetron sputtering is developed. The results of the process of surface preparation for coating, the results of measuring of the deposition rate of layers of SiO₂ and Al,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Государственный контракт № 02.G25.31.0043.

the resistivity of the aluminum film which depends on the conditions and deposition conditions are given. The basic technological modes of deposition of the coating layers are defined.

Keywords: radioreflective coating, vacuum deposition, plasma-supporting gas.

В состав современных космических аппаратов (КА) входят высокоточные углепластиковые рефлекторы антенн диаметром от 0,6 до 3 м. Для повышения эффективности антенно-фидерных систем (АФС) необходимо обеспечить максимальное отражение радиоизлучения рефлекторами антенн. Для этого на поверхность рефлектора наносят радиоотражающее покрытие, коэффициент радиоотражения которого на частоте 24 ГГц должен быть не менее 0,98, терморadiационные характеристики A_s – не более 0,35, E_p – не более 0,20 [1; 2]

При создании радиоотражающего покрытия необходимо учитывать множество факторов, непосредственно влияющих на возможность применения разработанной схемы в конструкции АФС КА, начиная от структуры (изотропности) поверхности углепластиковой подложки, состава, толщины материалов слоев радиоотражающего покрытия, согласования их электрохимических, тепловых, адгезионных, прочностных характеристик и заканчивая стабильностью характеристик покрытий к воздействию факторов хранения и деструктивных факторов космического пространства.

Для создания высокоэффективного в высокочастотном диапазоне радиоотражающего покрытия на углепластике необходимо проведение следующих операций:

- подготовка поверхности под нанесение слоев (очистка поверхности углепластика);
- осаждение подслоя;
- осаждение отражающего слоя;
- осаждение защитной пленки.

Разработку технологии напыления многослойного радиоотражающего покрытия методом магнетронного распыления осуществляли на вакуумной установке АРМ НТП.

Основное назначение установки – осаждение многослойных модифицирующих тонкопленочных покрытий на поверхность твердых тел, обработка твердых тел потоками ионов с различной энергией, проведение различных ионно-плазменных исследований для научных целей, а также оптимизация параметров технологических процессов промышленных установок.

Подготовку поверхности осуществляли с помощью ионного источника.

В зависимости от энергии иона, его природы, а также природы распыляемого материала коэффициент распыления может достигать нескольких единиц атом/ион. Помимо этого на эффективность процесса распыления влияет угол падения ионов. Обычно поток ионов стараются направить на поверхность подложки под углом, который для большинства случаев находится в окрестности 45° . Перед процессом очистки рабочая камера откачивается до давления остаточных газов $10^{-5} \dots 10^{-3}$ Па.

К числу достоинств метода очистки пучком ионов с низкой энергией можно отнести высокую однородность обработки, хорошую управляемость процессом, низкие энергозатраты, эффективную очистку практически любых твердых поверхностей.

Для исследования влияния предварительной ионной очистки на адгезию покрытий проводили ионную очистку с последующим осаждением подслоя Ni-Cr. В качестве рабочего газа применялся Ar и O_2 . В экспериментах использовались пластины углепластика с предварительным зашкуриванием, без зашкуривания и образцы, поверхность которых была покрыта лаком.

Откачка рабочей камеры проводилась до значений $P_{ост} = 4 \dots 4,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Параметры проведения ионной очистки следующие: давление рабочего газа $5,2 \dots 5,4 \cdot 10^{-2}$ Па (Ar) и $4,0 \dots 4,6 \cdot 10^{-2}$ Па (O_2), блок питания ионного источника работал в режиме стабилизации напряжения 3 кВ. Осаждение подслоя Ni-Cr проводили по режиму: $W_M = 3$ кВт, $P_{Ar} = 1,2 \cdot 10^{-1}$ Па.

Наличие адгезии проверялась экспресс-методом прямого отрыва приклеенной к поверхности покрытия липкой ленты. Выявлено, что адгезия пленки присутствует при различной последовательности ионной обработки поверхности углепластика, обработку потоком Ar^+ , предпочтительнее проводить перед применением ионов O_2^+ , так как ионы кислорода, скорее всего, проводят некоторую активацию поверхности, которая после обработки ионами аргона (распыления тонкого поверхностного слоя) может снизить свою контактную способность.

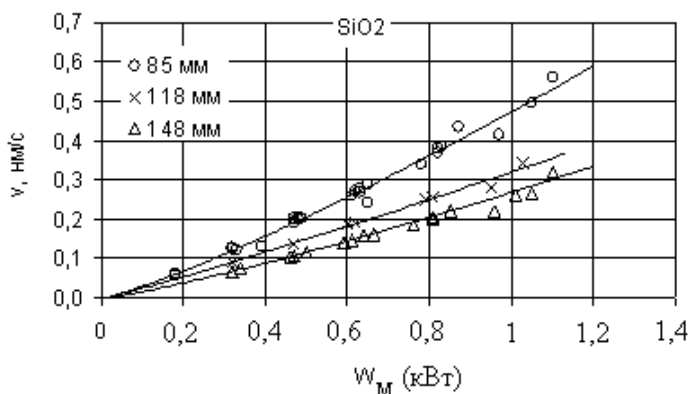
Ионная очистка проводилась в проходном режиме, в течение 10 проходов. Время прохода 1 мин, соответственно, длительность процесса составляет 10 мин.

Определение скорости осаждения слоев проводилось с помощью измерителя на основе кварцевого пьезоэлемента «Микрон-5». Держатель с пьезоэлементами вводился в рабочую камеру прямо в зону осаждения.

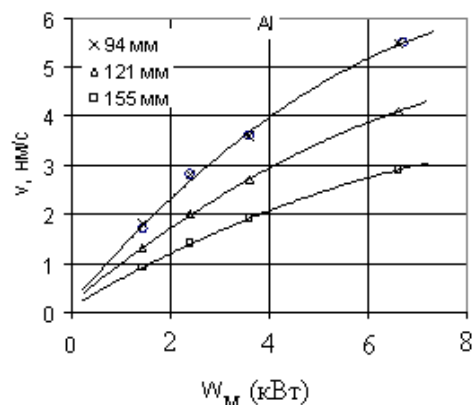
На рисунке приведены результаты измерения скорости осаждения (v) слоев SiO_2 и Al в зависимости от рабочей мощности магнетрона (W_M).

Экспериментальные исследования показали, что расчетная скорость осаждения на 10 % выше показаний измерителя. Для уточнения скорости осаждения были проведены эксперименты по осаждению пленок алюминия со «ступенькой» для последующего измерения их толщины механическим профилометром. Пленки Al осаждали на поверхности стеклянных свидетелей. В данном случае контроль скорости осаждения не проводился. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что разница между толщиной покрытия рассчитанной по данным v и измеренной профилометром составляет $\pm 6 \dots 8$ %. В целом к результатам профилометрии ближе значения толщины, рассчитанные по v .



а



б

Зависимость скорости осаждения SiO_2 (а) и Al (б) от рабочей мощности магнетрона и расстояния между пьезоэлементом и мишенью

Таблица 1

Толщина образцов пленки Al (мкм)

№ образца	Мощность блока питания, кВт	Количество периодов или время	Рассчитанная на основе v	Рассчитанная на основе vr	Полученная из профилограмм
1	6,7	25 периодов	0,52	0,56	0,62
2	3,6	23 периода	0,31	0,34	0,35
3	6,6	1 мин 23 с	0,45	0,49	0,44
4	6,6	143 периодов	2,96	3,173	3,28...3,4
5	6,5	9 мин 05 с	2,965	3,183	3,28
6	3,6	13 мин 54 с	3,002	3,278	3,14...3,2

Таблица 2

Данные, полученные в режиме имитации осаждения покрытия на рефлектор

Время одного оборота рефлектора, мин	Материал мишени	Размер мишени, мм	Расстояние до поверхности рефлектора, мм	W_M , кВт	Скорость осаждения, нм/оборот	Толщина слоя, мкм	Время осаждения слоя
7	Ni-Cr	700×100	96	3	14	0,2	1 час 40 мин
	Al	700×100	96	6,6	37,7	3	9 час 20 мин
	SiO_2	700×100	94	1	2,1	0,2	11 часов

Основываясь на данных vr табл. 1, можно вычислить толщину слоя, наносимого за один период. Например, при $W_M = 6,6...6,7$ кВт эта величина будет 3,8 с 5,9 нм/с = 22,4 нм.

Аналогично рассчитывали скорость осаждения подслоя из нихрома и защитного слоя оксида кремния.

В ходе экспериментов по определению скорости осаждения слоев получены следующие данные: на расстоянии ~100 мм от мишени скорость осаждения Al ($W_M = 6,6$ кВт) составляет 5,9 нм/с, скорость осаждения SiO_2 ($W_M = 1$ кВт) 0,4 нм/с.

Результаты экспериментов по определению скорости в режиме имитации осаждения покрытия на рефлектор показаны в табл. 2. Ввиду специфики процесса скорость осаждения приведена в нм/оборот.

В этих условиях сохраняется возможность снижения времени производства за счет поднятия скорости осаждения защитной пленки, однако перед этим необходимо выяснить влияние роста W_M на состояние мишени Si (95 %): Al (5 %).

Измерения удельного сопротивления алюминиевой пленки и зависимости его от условий и режимов напыления показали, что в случае периодического осаждения, значения удельного сопротивления несколько выше по сравнению с результатами, полученными при неподвижном режиме. Судя по относительно небольшой разнице, можно сказать, что граница раздела формируется частично или же не формируется вообще. Однако последнее маловероятно, если учесть, что осажденный слой весьма длительное время контактирует с окружающей средой. Необходимо добавить, что чем больше это время, тем больше становится количество и других дефектов (включений и дислокаций) структуры. В таких условиях для получения покрытия предпочтительнее использовать режимы с большими значениями W_M . В этом случае за один период (или оборот) осаждается слой относительно большой толщины, уменьшается общее время осаждения покрытия и, соответственно, уменьшается влияние окружающей среды на структуру покрытия.

В ходе исследования были получены пленки Al толщиной 0,53 мкм на плоских стеклянных подложках 100×100 мм². Напряжение между электродами регистрировалось вольтметром FLUKE 8846A, ток контролировался универсальным измерителем MY64. Расчет удельного сопротивления пленок проводился по формуле

$$R_S = \frac{\rho}{h} = \frac{U \cdot 2\pi}{I \cdot \ln 2} = 9,06 \frac{U}{I}.$$

Полученные данные приведены в табл. 3.

При сравнении значений ρ_{vp} , приведенных в табл. 3, с ρ_{vp} близкого по толщине образца 1 (см. табл. 2) видно, что наилучшее совпадение у пленки, полученной без использования щели. Для остальных пленок удельное сопротивление больше в 1,1 раза.

Таким образом, в результате исследований выяснено, что при периодическом режиме осаждения покрытия ($L = 10$ см, время периода 3 мин, время осаждения 3,8 с, скорость осаждения 21,7 нм/проход, $W_M = 6,7$ кВт) пленка Al толщиной 3 мкм имеет удельное сопротивление, превышающее требуемое в 1,6 раза. Ввиду особенностей процесса осаждения это обстоятельство связано со слоистостью полученной пленки и наличием в ее структуре других различных дефектов.

При проведении зондовых измерений неожиданно низкое значение удельного сопротивления показала пленка, полученная в периодическом режиме без использования ограничивающей зону осаждения щели.

Для напыления использовали мишени из нихрома X20H80 чистотой 99,9 % ГОСТ 10994, алюминия чистотой 99,99 % ГОСТ 25905 и оксида кремния (состав мишени Si-95 %, Al-5 %).

Подслой Ni-Cr осаждался за 7 или 14 периодов (толщина 0,1 и 0,2 мкм), соответственно длительность процессов была 21 и 46 мин. Давление рабочего газа (Ar) составляло $1,2 \dots 1,4 \cdot 10^{-1}$ Па. Блок питания работал

в режиме стабилизации мощности, параметры питания магнетрона были следующие: $W_M = 3$ кВт, $6,8 \dots 7,4 \times 440 \dots 430$ В

Алюминиевый слой осаждался в течение 87 и 30 периодов (толщина 3 и 1 мкм), длительность процессов была 4 ч 21 мин и 1 ч 30 мин соответственно. Давление рабочего газа (Ar) поддерживалось на уровне $8,6 \dots 8,8 \cdot 10^{-2}$ Па. Блок питания работал в режиме стабилизации мощности, параметры питания магнетрона были следующие: $W_M = 6,5$ кВт, $15 \text{ A} \times 431 \dots 435$ В. После осаждения проводящего слоя большой толщины на его поверхности наблюдалось увеличение шероховатости связанное со структурными изменениями в алюминиевом покрытии.

Защитная пленка SiO₂ ввиду малой скорости роста также потребовала большого количества периодов осаждения, от 42 (0,1 мкм) до 95 (0,2 мкм), длительность процессов была 2 часа 06 мин и 4 часа 25 мин. Давление рабочего газа: $P_{Ar} = 1,5 \dots 1,6 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,1 \dots 0,2 \cdot 10^{-1}$ Па. После включения магнетрона суммарное давление газовой смеси снижалось до $1,05 \dots 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па. Блок питания работал в режиме стабилизации мощности, параметры питания магнетрона были следующие: $W_M = 1$ кВт, $6,5 \dots 6,6 \text{ A} \times 153 \dots 160$ В. Ввиду явления интерференции пленка SiO₂ придавала окраску поверхности радиоотражающего покрытия. Так как SiO₂ обладает небольшим показателем преломления, интенсивность окраски была небольшой.

Таким образом, на установке АРМ НТП общая длительность технологического процесса может составить от 4 ч до 7 ч 30 мин, в зависимости от состава покрытия и толщины его слоев.

Ниже приведены данные по режимам осаждения и схемам изготовления радиоотражающих покрытий (табл. 4). Все образцы перед напылением слоев были обработаны потоком ионов Ar⁺ и O₂⁺.

Таблица 3

Результаты зондовых измерений

Ширина щели, см	Толщина пленки, рассчитанная на основе v_p , мкм	Ток между электродами зонда, мА	Напряжение между электродами зонда, мВ	ρ_{vp} , мкОм·см
12	0,54	8,82	0,132	7,3
	0,54	8,78	0,131	7,3
16	0,54	8,82	0,134	7,4
	0,54	8,69	0,128	7,2
Без щели	0,53	8,73	0,112	6,2

Таблица 4

Образцы радиоотражающих покрытий и технологии их нанесения

№ образца	Технологические режимы осаждения слоев	Подготовка поверхности	Адгезия	Толщина покрытия, мкм		
				NiCr	Al	SiO ₂
6341-05(1)	Ni-Cr: $P_{Ar} = 1,2 \cdot 10^{-1}$ Па Блок питания работал в режиме стабилизации мощности $W_M = 3$ кВт, $430 \text{ B} \times 7 \text{ A}$ Al: $P_{Ar} = 8,8 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, $431 \text{ B} \times 15,1 \text{ A}$ SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,5 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,2 \cdot 10^{-1}$ Па $W_M = 1$ кВт, $151 \text{ B} \times 6,6 \text{ A}$	Зашкур.	+	0,1	3	0,2

№ образца	Технологические режимы осаждения слоев	Подготовка поверхности	Адгезия	Толщина покрытия, мкм		
				NiCr	Al	SiO ₂
	После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,15 \cdot 10^{-1}$ Па					
6341-05(2)		Незашкур.	+			
6341-05(5)	Ni-Cr: $P_{Ar} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 3$ кВт, 440 В×6,8 А Al: $P_{Ar} = 8,6 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, 430 В×15 А	Зашкур.	+	0,2	3	0,2
6341-05(6)	SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,6 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,15 \cdot 10^{-1}$ Па $W_M = 1$ кВт, 152 В×6,7 А После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па	Незашкур.	+			
6341-05(9)	Al: $P_{Ar} = 8,8 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, 433 В×15 А SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ Па, $P_{O_2} = 0,2 \cdot 10^{-1}$ Па	Зашкур.	+	-	3	0,2
6341-05(10)	$W_M = 1$ кВт, 155 В×6,5 А После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,2 \cdot 10^{-1}$ Па	Незашкур.	+			
6341-05(18)	Al: $P_{Ar} = 8,7 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, параметры разряда 433 В×15 А SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,5 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,15 \cdot 10^{-1}$ Па	Зашкур.	+	-	1	0,2
6341-05(19)	$W_M = 1$ кВт, параметры разряда 156 В×6,5 А После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,07 \cdot 10^{-1}$ Па	Незашкур.	+			
6341-05(23)	Al: $P_{Ar} = 8,7 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, 435 В×15 А SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,55 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,17 \cdot 10^{-1}$ Па	Зашкур.	+	-	1	0,2
6341-05(24)	$W_M = 1$ кВт, 160 В×6,5 А После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,02 \cdot 10^{-1}$ Па	Незашкур.	+			
6341-05(28)	Al: $P_{Ar} = 8,6 \cdot 10^{-2}$ Па $W_M = 6,5$ кВт, 433 В×15 А SiO ₂ : $P_{Ar} = 1,5 \cdot 10^{-1}$ Па, $P_{O_2} = 0,2 \cdot 10^{-1}$ Па	Зашкур.	+			0,1
	$W_M = 1$ кВт, 158 В×6,4 А После включения магнетрона $P_{Ar+O_2} = 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па					

Из табл. 4 видно, что после очистки поверхности углепластика потоками ионов аргона и кислорода напыленные покрытия имеют удовлетворительную адгезию, следовательно, проведение предварительного зашкуривания поверхности углепластика при такой обработке не требуется.

Таким образом, разработана технология напыления 2- и 3-хслойных радиоотражающих покрытий с коэффициентом радиоотражения на частоте 24 ГГц не менее 0,98, с терморadiационными характеристиками As до 0,32, En до 0,16, а также выбраны материалы и обоснованы оптимальные диапазоны толщины слоев многослойного радиоотражающего покрытия.

Данные схемы изготовления многослойного радиоотражающего покрытия могут быть рекомендованы для нанесения на углепластиковые рефлекторы антенн, работающих в диапазоне частот до 24 ГГц.

Библиографические ссылки

1. Свадковский И. В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий. Минск, Бестпринт, 2002. 214 с.
2. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.

References

1. Svadkovskij I. V. *Ionno-plazmennye metody formirovaniya tonkoplennocnyh pokrytij* (Ion-plasma methods of forming thin-film coatings). Minsk, Bestprint, 2002, 214 p.
2. Danilin B. S., Syrchin V. K. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* (Magnetron sputtering systems). Moscow, Radio i svjaz', 1982, 72 p.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Харламов В. А., Чернятина А. А., Хоменко И. И., 2013

УДК 539.234

**ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ РАДИООТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ
НА СТОЙКОСТЬ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМ ФАКТОРАМ***А. Е. Михеев¹, С. С. Ивасев¹, А. Б. Кузнецов², И. В. Башков², Д. В. Раводина¹¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: michla@mail.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Проведены ускоренные климатические испытания (УКИ) образцов с радиотражающим покрытием. Представлены результаты испытаний образцов до и после УКИ. Контролю подвергались: внешний вид, терморadiационные характеристики A_s , E_n , коэффициент радиотражения, адгезионная прочность. Также были проведены испытания образцов на радиационное воздействие.

Проведенные испытания показали, что требуемыми характеристиками обладают образцы радиотражающих покрытий, выполненные по трем схемам. Разработанные покрытия могут быть рекомендованы для нанесения на углепластиковые рефлекторы антенн, работающих в диапазоне частот до 24 ГГц.

Ключевые слова: радиотражающие покрытия, вакуумное нанесение покрытий, испытания покрытий.

**TESTS OF SAMPLES RADIOREFLECTIVE COATINGS HARDINESS
TO EXTERNAL FACTORS**А. Е. Михеев¹, С. С. Ивасев¹, А. Б. Кузнецов², И. В. Башков², Д. В. Раводина¹¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: michla@mail.ru

²JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

The accelerated environmental testing (USP) of the samples with radioreflexive surface is conducted. The results of the test samples before and after the USP are given. Appearance, termoradiation characteristics of A_s , E_n , radioreflexion coefficient, adhesion strength was under control. The samples for radiation exposure were tested.

The tests show that the samples have the desired characteristics of radioreflexive coatings made by the three schemes. Developed coatings can be recommended for application of carbon fiber reflector antennas operating at frequencies up to 24 GHz.

Keywords: radioreflexive coating, vacuum deposition, coating probation.

Радиотражающие покрытия рефлекторов космических аппаратов Ка-диапазона должны обладать следующими характеристиками: коэффициент радиотражения на частоте 22–24 ГГц не менее 0,98, стабильные термооптические характеристики, адгезионная прочность, стойкость к температурному диапазону эксплуатации. Покрытия должны выдерживать воздействие ионизирующего излучения в течение 15 лет и хранение в условиях склада при влажности 80 % в течение 6 лет.

Для создания высокоэффективного в высокочастотном диапазоне радиотражающего покрытия была разработана технология напыления многослойного покрытия методом магнетронного распыления, были изготовлены экспериментальные образцы радиотра-

жающих покрытий (табл. 1).

Изготовленные образцы подвергались различным видам испытаний. Ускоренные климатические испытания (УКИ), предназначенные для имитации хранения элементов конструкций и КА в процессе производственного цикла и хранения в условиях склада, проводили в климатической камере КРК-04, которая позволяет проводить испытания в диапазоне температур от –30 °С до +100 °С и относительной влажности в диапазоне от 10 до 100 %. Образцы крепились в вертикальном положении на специальную технологическую оснастку. Ускоренные климатические испытания проводили согласно ГОСТ 15150 по режимам, указанным в табл. 2.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 02.G25.31.0043.

Таблица 1

Изготовленные образцы радиоотражающего покрытия

№ образца	Схема покрытия толщина покрытия, мкм			Размер образцов, мм
	NiCr	Al	SiO ₂	
6341-05(1)	0,1	3	0,2	100×100
6341-04(4)				35×35
6341-05(5)	0,2	3	0,2	100×100
6341-04(8)				35×35
6341-05(9)	–	3	0,2	100×100
6341-04(12)				35×35
6341-05(14)	0,2	1	0,2	100×100
6341-04(16)				35×35
6341-05(23)	–	1	0,2	100×100
6341-04(26)				35×35
6341-05(28)	0,1	1	0,1	100×100
6341-04(28)				35×35
6341-05(29)	0,1	1	–	100×100
6341-04(30)				35×35

Таблица 2

Режимы УКИ

Температура, °C	Влажность, %	Время выдержки, сутки	Количество циклов	Имитация срока службы
70 ± 2	Не нормируется	9	6	6 лет наземного хранения
30 ± 2	95 ± 3 %	3		

Технологическую оснастку с образцами помещали в камеру, причем расстояние до стенок и верхней части камеры составляло не менее 100 мм, до дна камеры – 200 мм.

До и после испытаний контролировали следующие характеристики:

- внешний вид многослойного радиоотражающего покрытия;
- терморadiационные характеристики A_s , E_n ;
- коэффициент радиоотражения;
- адгезионную прочность.

Измерение коэффициента поглощения солнечного излучения (A_s) проводилось при помощи спектрофлюксметра LPSR 300. Измерение коэффициента излучения (E_n) проводилось на рефлектометре TEMP-2000A.

Измерение коэффициента радиоотражения проводили с помощью генератора Г4-155, аттенюатора ДЗ-35А и измерительной линии Р1-30.

Адгезионную прочность покрытий контролировали с помощью пневматического адгезиометра DeFelsko PosiTest AT-M.

Осмотр внешнего вида образцов многослойных радиоотражающих покрытий показал, что после проведенных ускоренных климатических испытаний внешний вид покрытий не изменился.

Измерения терморadiационных характеристик и толщины покрытий до и после УКИ показали что они остались неизменными, в пределах погрешности прибора.

На образцах радиоотражающих покрытий без до-

полнительного адгезионного подслоя наблюдается уменьшение адгезии покрытия.

Коэффициент радиоотражения многослойных радиоотражающих образцов покрытий до и после воздействия климатических факторов представлен в табл. 3.

Результаты измерений коэффициента радиоотражения образцов после воздействия ускоренных климатических испытаний показали ухудшение радиохарактеристик на образцах с толщиной алюминиевого слоя 3 мкм. Ухудшение, скорее всего, связано с образованием микротрещин в более толстом слое алюминиевого покрытия и началом коррозионного процесса при воздействии температуры и влажности при испытаниях, которые не видны невооруженным глазом. Это подтверждает и микроизображения поверхности образцов с толщиной алюминиевого слоя 1 и 3 мкм, зафиксированные с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3

Образцы с алюминиевым покрытием толщиной 1 мкм сохраняют свои радиохарактеристики.

Испытания на радиационное воздействие проводили на образцах, прошедших предварительно климатические испытания.

Радиационное облучение проводилось электронами на линейном ускорителе ЭЛУ-4, аттестованном в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ РВ 20.57.415–97 и ГОСТ РВ 20.57.308–98.

В процессе эксплуатации под воздействием ионизирующих излучений рабочие характеристики покрытий могут изменяться.

Коэффициент радиоотражения до и после испытаний

№	Схема покрытия толщина покрытия, мкм			Коэффициент радиоотражения	
	NiCr	Al	SiO ₂	До воздействия	После воздействия
Требуемые характеристики				≥ 98	
6341-04(4)	0,1	3	0,2	98,05	97,80
6341-04(8)	0,2	3	0,2	98,02	97,80
6341-04(12)	–	3	0,2	98,02	97,90
6341-04(16)	0,2	1	0,2	98,12	98,05
6341-04(26)	–	1	0,2	98,15	98,03
6341-04(28)	0,1	1	0,1	98,20	98,15
6341-04(30)	0,1	1	–	98,21	98,05

Для определения диапазона изменения характеристик покрытий КА под воздействием ионизирующих излучений КП, необходимо иметь данные о дозах, накапливаемых в них за весь период эксплуатации КА. Расчет поглощенных доз от электронов и протонов РПЗ в условиях КП проводится на базе моделей потоков электронов и протонов РПЗ. При сроке эксплуатации КА 15 лет материалы внешних поверхностей накапливают среднюю дозу до $6,6 \cdot 10^6$ Гр.

Испытания разрабатываемых покрытий на воздействие электронов подтверждают работоспособность покрытий в условиях воздействия космической радиации в течение 15 лет.

Облучение электронами проводили в среде газобразного азота и располагали так, чтобы их линейные размеры в направлении облучения не превышали значений, определяемых из выражения

$$E \geq 10 [L \cdot \rho]^{0,76},$$

где E – энергия электронов, МэВ; L – линейный размер (толщина) группы образцов в направлении облучения; ρ – плотность образцов.

Средняя плотность потока электронов в месте размещения образцов – $\phi_e = 1,15 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Погрешность измерения средней энергии – не более 8 %.

Неравномерность плотности потока электронов в пределах облучаемой площади по результатам измерений составляла не более 18 %.

Погрешность измерения средней плотности потока электронов ϕ_e в плоскости облучения – не более 9 %.

Погрешность мониторингирования и поддержания средней плотности потока в процессе облучения – не более 5 %.

Значение поглощенной дозы D рассчитывали по формуле:

$$D = \phi_e \cdot t \cdot \delta \text{ (Гр)},$$

где ϕ_e – средняя плотность потока электронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; t – время облучения, с; δ – удельная поглощенная доза по кремнию на один электрон с энергией 4 МэВ, равная $2,55 \cdot 10^{-8} \text{ рад см}^{-2} \text{ электрон}^{-1}$.

В процессе облучения электронами в течение 33 ч, поглощенная доза образцов покрытий составила $6,6 \cdot 10^6$ Гр.

До и после испытаний контролировали следующие характеристики:

- внешний вид многослойного радиоотражающего покрытия;
- терморadiационные характеристики A_s , E_n ;
- коэффициент радиоотражения;
- адгезионную прочность.

Осмотр внешнего вида показал, что после проведенных испытаний на радиационное воздействие внешний вид покрытий не изменился.

Воздействие радиационных испытаний до дозы $6 \cdot 10^6$ Гр не приводит к изменению терморadiационных характеристик, адгезионной прочности и толщины покрытий.

Радиационное воздействие приводит к незначительному снижению коэффициента радиоотражения. Образцы покрытий с толщиной алюминиевого слоя 1 мкм имеют коэффициент радиоотражения более 0,98, с алюминиевым покрытием толщиной 3 мкм – имеют значение незначительно меньше.

Испытания на термоциклирование в вакууме проводили на образцах, прошедших предварительно климатические испытания и радиационное воздействие. Термоциклирование образцов проводили в термовакуумной камере ВУ-100.

Термовакuumная камера обеспечивает:

- вакуум не менее $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па;
- диапазон температур от минус 190 °С до плюс 250 °С.

Температура в камере контролируется термометрами сопротивления проволоочными по ОСТ 92-0694. Термометры сопротивления устанавливаются на исследуемом образце и на термостол.

Контроль вакуума в камере измерялся при помощи вакуумметра ионизационно-термопарного типа ВИТ-3.

Погрешность измерения параметров испытаний составляла не более: ± 3 °С при измерении температуры, ± 60 % при измерении вакуума (в интервале от 10^5 до $9,25$ Па), ± 35 % при измерении вакуума (в интервале от $9,25$ до $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па).

Термоциклирование образцов проводили в соответствии с ECSS-Q-70-04a в вакуумной камере при остаточном давлении не более $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Образцы располагали на термостол покрытием вниз, сверху закрывали коробом из фольги и экранно-вакуумной теплоизоляции. Нагрев и охлаждение осуществляли за счет теплового контакта и радиационного излучения с поверхности термостола. Нагрев тер-

мостола осуществляли лампами типа КГ-127-1000, а охлаждение – жидким азотом. Скорость нагрева-охлаждения составляла от 5 до 10 град/мин. Излучение от ламп на поверхность образцов не попадало. Количество циклов равнялось 100, как это требует ECSS-Q-70-04a для установления температурного диапазона эксплуатации покрытий в вакууме.

Режимы термоциклирования приведены в табл. 4.

До и после испытаний контролировали следующие характеристики:

- внешний вид многослойного радиоотражающего покрытия;
- терморadiационные характеристики A_s , E_n ;
- коэффициент радиоотражения;
- адгезионную прочность.

Осмотр внешнего вида показал, что после проведенных испытаний на термоциклирование в вакууме внешний вид покрытий не изменился.

Измерения терморadiационных характеристик, адгезии и толщины покрытий до и после испытаний на термоциклирование в вакууме показали, что они остались неизменными, кроме образцов с радиоотражающим покрытием без применения адгезионного, выравнивающего КТР подслоя из нихрома, у них адгезия снизилась и составляет 33–37 кг/см². Все остальные образцы сохранили адгезию.

Изменения терморadiационных характеристик A_s и E_n радиоотражающего покрытия находятся в пределах погрешности измерения приборов ($\pm 0,02$).

Термоциклирование в вакууме приводит к незначительному снижению коэффициента радиоотражения.

Результаты контроля характеристик с двухслойной схемой изготовления (без защитного слоя SiO₂) показали, что при испытаниях данная схема изготовления покрытия показала меньшую стабильность термора-

диационных коэффициентов по сравнению с трехслойной схемой, поэтому такое двухслойное покрытие может быть использовано в конструкциях, в которых не возникают истирающие нагрузки и не требуется определенная механическая устойчивость.

Измерения спектрального коэффициента отражения R_λ радиоотражающих покрытий, выполненные на спектрофотометре LPSR 300, в оптическом диапазоне длин волн, отвечающем за поглощение электромагнитного излучения Солнца, от 250 до 2500 нм показали, что после воздействия УКИ, термоциклирования и радиации наблюдается незначительное снижение отражения покрытия (от 2 до 5 %) в УФ и видимой части спектра.

Таким образом, проведенные испытания (УКИ, радиационное воздействие и термоциклирование в вакууме) показали, что при контроле всех характеристик, наилучшие результаты и требуемые характеристики имеют образцы радиоотражающих покрытий следующих схем изготовления:

- нихром (0,2 мкм) + алюминий (1 мкм) + оксид кремния (0,2 мкм);
- нихром (0,1 мкм) + алюминий (1 мкм) + оксид кремния (0,1 мкм);
- нихром (0,1 мкм) + алюминий (1 мкм) (при отсутствии механических нагрузок).

Данные схемы изготовления многослойного радиоотражающего покрытия выдержали все испытания с сохранением характеристик и могут быть рекомендованы для нанесения на углепластиковые рефлекторы антенн, работающие в диапазоне частот до 24 ГГц.

Разброс толщин слоев нихрома и защитного слоя из оксида кремния составлял ± 20 нм, алюминиевого слоя – ± 100 нм (не более ± 15 %).

Таблица 4

Режимы термоциклирования

Воздействующие факторы	Показатели воздействующих факторов
Температурный интервал для квалификации (с учетом квалификационного запаса ± 10 °C)	от –160 до 160 °C
Вакуум, мм рт.ст, не более	$1 \cdot 10^{-5}$
Время выдержки при крайних температурах, мин	20
Скорость нагрева и охлаждения, град/мин	от 5 до 10
Количество циклов	100

Библиографические ссылки

1. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме : пер. с англ. М. : Госэнергоиздат, 1962. 608 с.
2. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Материаловедение в микроэлектронике. М. : Энергия, 1977. 280 с.

References

1. Hollend L. *Nanesenie tonkih plenok v vakuume* (Deposition of thin films in a vacuum lane). Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962, 608 p.
2. Palatnik L. S., Sorokin V. K. *Materialovedenie v mikroelektronike* (Materials science in microelectronics). Moscow, Energiya Publ., 1977, 280 p.

© Михеев А. Е., Ивасев С. С., Кузнецов А. Б., Башков И. В., Раводина Д. В., 2013

УДК 004.9:629.7.03

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ LVM Flow CV**

Л. А. Оборин¹, В. А. Колмыков², В. П. Жереб³, М. Е. Шилова¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shilovamashka@mail.ru

²ОАО «Красмаш»
Российская Федерация, 660123, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29
E-mail: kras@krasmail.ru

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660025, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95
E-mail: vpzhereb@rambler.ru

С использованием компьютерного моделирования, с помощью системы LVM Flow CV исследован процесс затвердевания отливок из стали типа ВНЛ. Обнаружены процессы неустойчивого поведения фронта кристаллизации расплава в течение первых 50 с, сопровождающиеся значительными колебаниями температуры и количества затвердевшего металла, которые связываются с газовыделением на фронте кристаллизации и значительной величиной изменения энтальпии кристаллизации. Предложено проводить плавку в вакууме и использовать материал формы с более высокой теплоаккумулирующей способностью. Компьютерное моделирование для этих условий показало возможность более монотонного изменения температуры и величины закристаллизовавшейся части расплава в начальный период кристаллизации, сокращение на 60 % продолжительности периода кристаллизации и создание благоприятных условий для охлаждения отливки. Достоверность компьютерных экспериментов подтверждается хорошим количественным совпадением температур кристаллизации по данным компьютерного моделирования и результатов термического анализа реального сплава.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, компьютерное моделирование кристаллизации сплава типа ВНЛ, система компьютерного моделирования LVM FLOW CV.

**IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF CASTINGS TURBOPUMP ASSEMBLY AIRCRAFT
POWER PLANTS USING THE COMPUTER SIMULATION SYSTEM LVM Flow CV**

L. A. Oborin¹, V. A. Kolmykov², V. P. Zhreb³, M. E. Shilova¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: shilovamashka@mail.ru

²JSC "KRASMASH"
29, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation
E-mail: kras@krasmail.ru

³Siberian Federal University
95, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation
E-mail: vpzhereb@rambler.ru

The process of solidification of steel castings such as VNL was investigated by the computer simulation using the system LVM Flow CV. Processes of erratic behavior of the melt crystallization front for the first fifty seconds, accompanied by a significant fluctuations in temperature and solidified metal, which bind to the gas evolution at the solidification front and the substantial value of the enthalpy change of crystallization were found. It is proposed to conduct melting in vacuum and use the mold material with a high heat storage capacity. Computer simulation for these conditions showed a monotonic possible temperature and magnitude of melt crystallized in an initial stage of crystallization, reducing by 60 % the duration of the period of crystallization and the creation of favorable conditions for the cooling of the casting. The reliability of the computer simulations was confirmed by the good quantitative agreement between the crystallization temperature according to the results of computer simulation and thermal analysis of the real alloy.

Keywords: investment casting, computer simulation of crystallization of the alloy type VNL, computer simulation system LVM Flow CV.

Надежность силовых установок (СУ) летательных аппаратов в значительной мере определяется конструктивной прочностью и герметичностью деталей турбонасосного агрегата (ТНА). Применение литейных технологий для изготовления деталей ТНА позволяет удовлетворить весь комплекс требований конструкторской документации (КД) и значительно снизить производственные затраты, при условии успешного решения задачи существенного повышения качества отливок, получаемых с помощью литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Используемые для изготовления литых деталей ТНА высокопрочные коррозионно-стойкие стали ВНЛ и сплавы на основе никеля склонны в процессе затвердевания к образованию внутренних дефектов разной природы, в частности, дефектов усадочного характера. Одним из путей эффективного снижения уровня таких дефектов и обеспечения требований КД к герметичности и конструктивной прочности литых деталей ТНА является реализация процесса управляемого затвердевания отливки.

Разработка такой технологии для сложных по геометрическим элементам отливок в ЛВМ с помощью традиционных технологических средств сопряжено с существенными техническими ограничениями и неприемлемыми затратами времени и средств. Поэтому для реализации требований КД был применен визуализированный метод компьютерного моделирования с помощью программного пакета LVM Flow CV [1], адаптированный для процесса изготовления литых деталей ТНА СУ летательных аппаратов.

Цель компьютерных экспериментов состояла в определении основных характеристик протекания процессов кристаллизации в разных частях отливок [2], в частности, определение изменений температуры и других характеристик расплава, двухфазной зоны и полученной отливки во времени, и выявлении основных причин появления дефектов. Определение температуры проводили с помощью виртуальных термопар, расположенных в местах тонких элементов отливки, на границах взаимодействия литейной формы и расплава, в нижней части отливки (рис. 1).

На первом этапе осуществляли моделирование плавки в открытой индукционной печи (ОИП). По результатам проведенного компьютерного моделирования обнаружен немонотонный характер понижения температуры расплава в первые 75 с (рис. 2). Сложный характер изменения температуры отливки при плавке в открытой индукционной печи сопровождается скачкообразными изменениями доли закристаллизовавшегося металла в интервале до 80 с, наблюдаемыми на кривых образования твердой фазы, представленных на рис. 3. Взаимозависимость этих особенностей на указанных кривых, по-видимому, связана с протекающими одновременно процессами тепло- и газовой выделений при кристаллизации расплава. Случайная локализация процесса выделения растворенных в расплаве газов при его охлаждении и кристаллизации, по-видимому, сопровождается понижением теплопроводности и нарушением всей динамики процесса теплопередачи при охлаждении и кристаллиза-

ции отливки. Пульсирующий характер изменений доли закристаллизовавшегося металла (рис. 3) и режима объемной усадки сопровождается образованием внутренних дефектов – окисной пленки, рыхлоты, пористости.

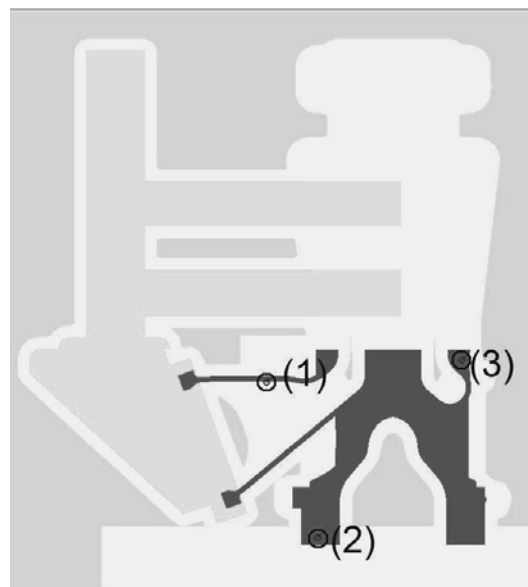


Рис. 1. Схема расположения виртуальных термопар на сечении отливки «корпус»:

1 – в тонком сечении отливки; 2 – в нижней части отливки; 3 – в широком сечении отливки

Для снижения количества растворенных в расплаве газов плавку в ОИП заменили на плавку в закрытой вакуумной индукционной печи (ВИП), а для улучшения тепловых условий в процессе охлаждения осуществили повышение термической емкости материала литейной формы. Для этого предусмотрели утепление тонких стенок отливки, тем самым усреднив их толщины по отношению к остальным элементам отливки, а также установили в нижней части холодильник в виде чугуновой дробы.

Результаты компьютерного моделирования исследуемого процесса в новых условиях, представленные на рис. 4 и 5, указывают на следующие существенные изменения. Значительно сокращается по времени (до 25 с) и приобретает монотонный характер процесс охлаждения расплава до температуры кристаллизации во всех местах установки виртуальных термопар и уменьшается интервал времени существования двухфазной зоны (рис. 4).

Отсутствие газовой выделений и уменьшение теплоаккумулирующей способности оболочки позволило полностью скомпенсировать $\Delta H_{\text{крист}}$, что проявляется в монотонном характере изменения доли твердой фазы во времени. Процесс формирования твердой фазы по данным рис. 5 протекает стационарно без заметных изменений пульсаций во всех исследованных местах и завершается через 450 с. Количественные оценки указывают на уменьшение на 40–50 % дефектов усадочного характера при вакуумной выплавке с применением дополнительных технологических приемов.

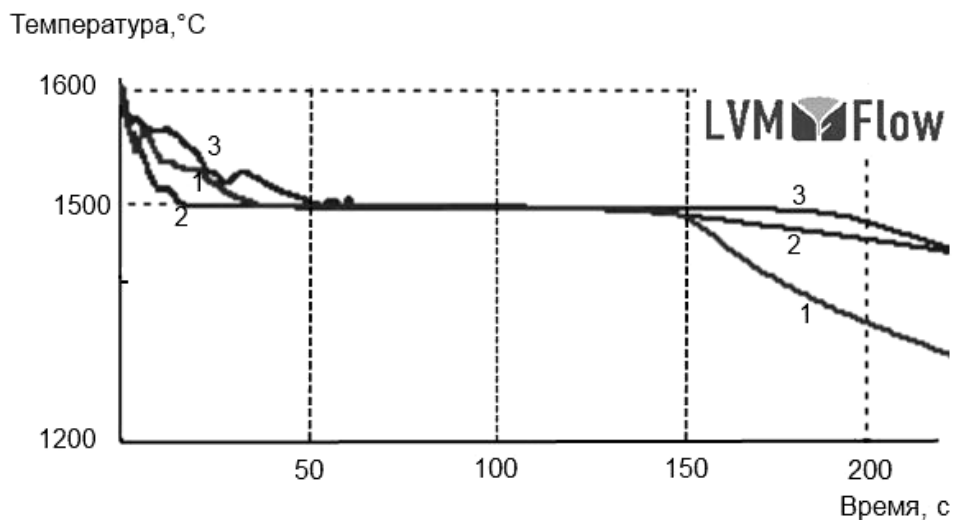


Рис. 2. Изменение температуры в отливке в открытой индукционной печи:
 1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

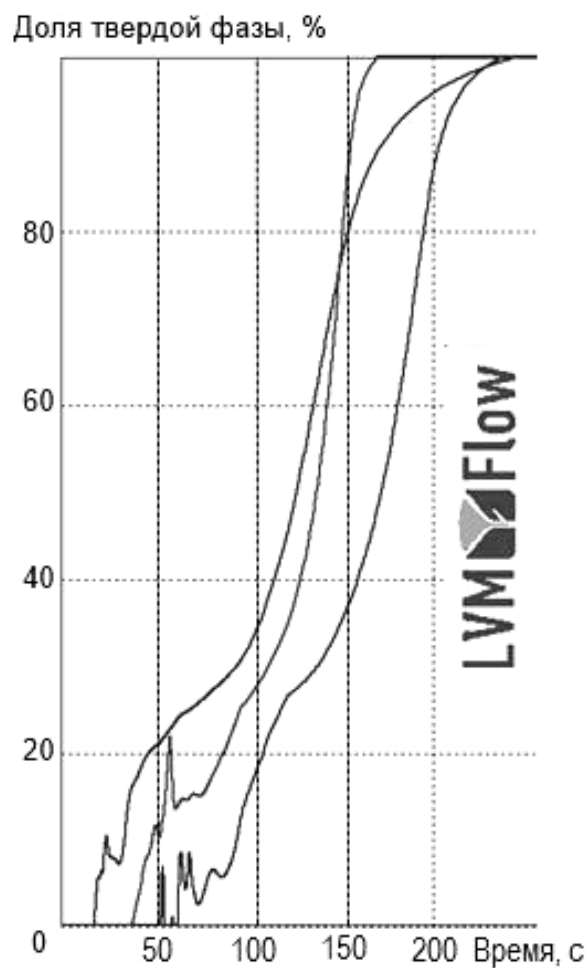


Рис. 3. Изменение доли твердой фазы при плавке в ОИП:
 1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

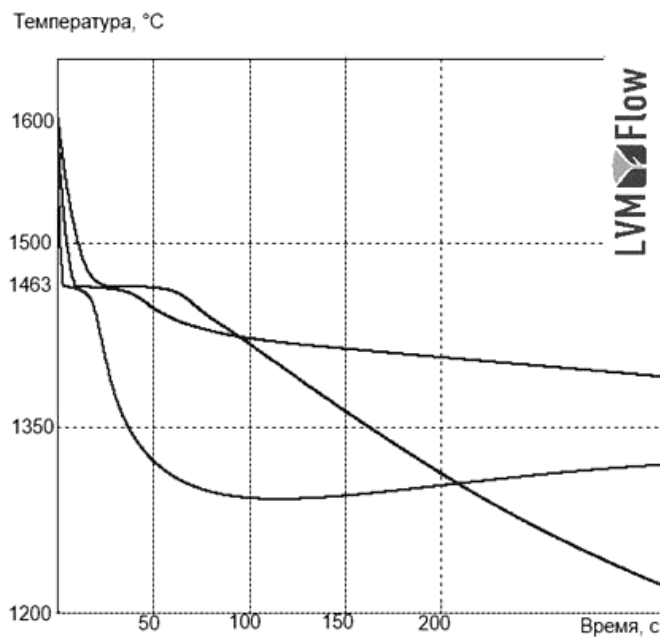


Рис. 4. Изменение температуры в отливке в вакуумной индукционной печи:
1 – виртуальная термопара в тонком сечении отливки; 2 – виртуальная термопара в нижней части отливки; 3 – виртуальная термопара в широком сечении отливки

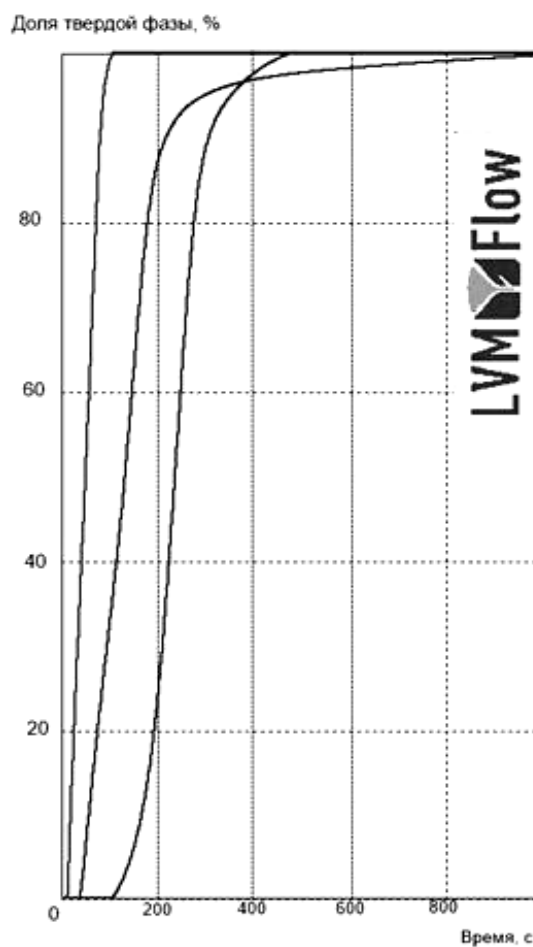


Рис. 5. Изменение доли твердой фазы при плавке в ВИП:
1 – термопара, установленная в тонком элементе отливки; 2 – термопара, установленная в нижней части отливки; 3 – термопара, установленная на границе взаимодействия литейной формы и расплава

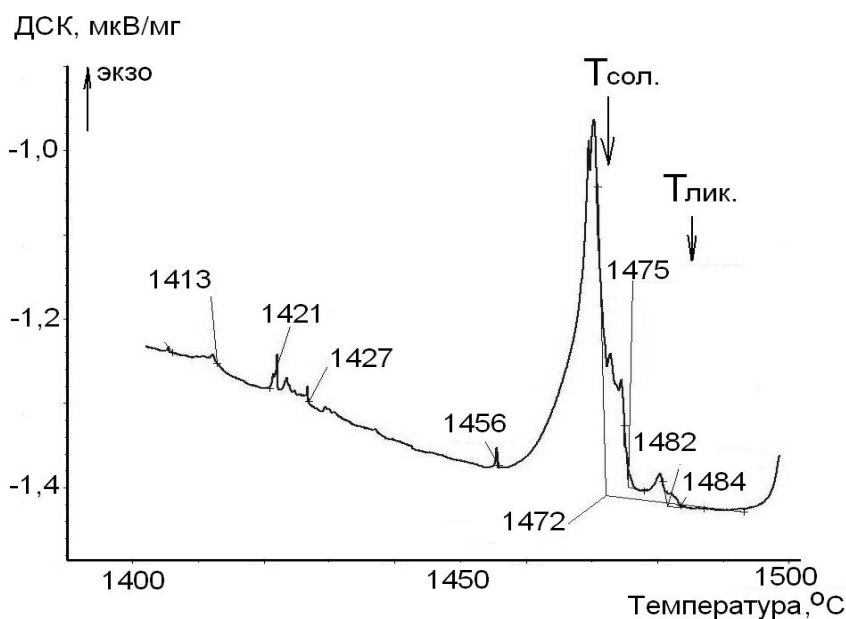


Рис. 6. Термограмма кристаллизации стали ВНЛ-6
Интервал $\Delta T = T_{лик} - T_{сол} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – двухфазная зона

Термический анализ процесса кристаллизации стали ВНЛ-6, выполненный в [3], указывает на температуру солидуса $T_{сол} = 1475\text{ }^{\circ}\text{C}$. Более низкотемпературные экзотермические эффекты, показанные на рис. 6, связаны с субсолидусными превращениями. Температурные кривые, полученные в результате компьютерного моделирования и представленные на рис. 2 и 4, указывают на температуры кристаллизации расплава $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1463\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно, что хорошо совпадает с результатами термического анализа реального расплава и позволяет надеяться на аналогичную достоверность результатов компьютерного моделирования.

Выполненное исследование также показало, что для литых деталей особой геометрической сложности (пространственные необрабатываемые поверхности, протяженные тонкие стенки, массивные фланцы) характерна объемная модель затвердевания, а не направленная или зонная.

Таким образом, компьютерное моделирование обеспечивает возможность виртуального анализа поведения металла в кристаллизующейся отливки и возможность оптимизации процесса за счет выбора условий. Для существенного сокращения количества усадочных дефектов – пор и рыхлот и организации эффективного тепломассопереноса необходимо применения дополнительных приемов:

- максимально возможное применение ВИП устарения окисных плен и создания условий ламинарного течения расплава в ОФ;
- применение холодильников;
- утепление материалами, с повышенными теплоаккумулирующими характеристиками в сравнении с материалом огнеупорной формы.

Библиографические ссылки

1. Журавлев В. А., Сухих С. М. Машинное моделирование формирования распределенной пористости и усадочной раковины при кристаллизации сплавов в слитки // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 80–84.
2. Борисов В. Т., Журавлев В. А., Колодкин В. М. Исследование напряжений и деформаций в ограниченной области, претерпевающей последовательную кристаллизацию // Прикладная механика. 1979. Т. 15, № 8. С. 65–71.
3. Оборин Л. А., Бабицкий Н. А., Жереб В. П. Термические превращения литейных высокопрочных сталей (ВНЛ) и жаропрочных сплавов (ВЖЛ) при плавлении и кристаллизации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. Т. 5, № 7. С. 724–730.

References

1. Zhuravlev V. A., Suhikh S. M. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1981, № 1, p. 80–84.
2. Borisov V. T., Zhuravlev V. A., Kolodkin V. M. *Prikladnaya mehanika*. 1979, vol. 15, № 8, p. 65–71.
3. Oborin L. A., Babickii N. A., Zhereb V. P. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*. 2012, vol. 5, № 7, p. 724–730.

© Оборин Л. А., Колмыков В. А.,
Жереб В. П., Шилова М. Е., 2013

РАЗДЕЛ
4



ЭКОНОМИКА



УДК 338.245.001.76

ФОРМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК: АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Ю. В. Ерыгин, А. М. Саакян

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: arevik.saakyan@inbox.ru

Обоснована необходимость государственного стимулирования инновационной деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Сформулированы принципы стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК, отвечающие современному состоянию и перспективам развития предприятий отрасли. Проведен анализ форм государственного стимулирования инновационной деятельности предприятий отрасли, определены особенности каждой из форм. Предложены классификационные признаки. Сделан вывод о том, что группировка существующих форм по предложенным признакам позволяет декомпозировать их на классы, отличающиеся целями, условиями и способом стимулирования, посредством реализации которых возможно решить задачу эффективного стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК.

Ключевые слова: предприятия ОПК, формы стимулирования инновационной деятельности.

FORMS OF STIMULATION OF INNOVATIVE ACTIVITY OF DEFENSE INDUSTRY ENTERPRISES: ANALYSIS AND CLASSIFICATION

U. V. Erygin, A. M. Saakian

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: arevik.saakyan@inbox.ru

The necessity of the state stimulation of the innovative activity of the defense industry complex enterprises (DIC) is proved. The principles of the stimulation of the innovative activity of the defense industry enterprises, answering to a current state and prospects of the development of the enterprises of branch are formulated. The analysis of forms of the state stimulation of the innovative activity of the enterprises of branch is carried out and the features of each of the forms are defined. The classification signs are offered. The conclusion is drawn that the group of existing forms on the offered signs allows to divide them into the classes, differing by the purposes, conditions and ways of stimulation, by means of which realization it is possible to solve a problem of the effective stimulation of the innovative activity of the defense industry enterprises.

Keywords: defense industry enterprises, forms of stimulation of innovative activity.

Одним из приоритетных направлений политики государства в настоящее время является решение задачи инновационного развития экономики страны и обеспечения ее конкурентоспособности на мировом рынке. Оборонно-промышленный комплекс занимает ключевое место в решении данной задачи, сосредоточив в себе значительную часть производственного и инновационного потенциала страны [1; 2].

Проводимые экономические реформы существенно повлияли на современное состояние предприятий ОПК и их возможности в осуществлении инновационной деятельности. Нынешнее состояние и специфика ОПК делают невозможным участие этого комплекса в инновационном развитии России без государственной поддержки. Интеграция ОПК в гражданский сектор экономики, в том числе в региональную экономику, позволяет говорить о том, что в стимулировании должны участвовать все уровни бюджета.

Современное состояние ОПК, изменение условий и целей развития предприятий, возникших в результате

перехода к рыночным отношениям, обуславливают необходимость не только повышения роли государственного стимулирования инновационной деятельности, но и введения новых принципов стимулирования, отвечающих задачам коммерциализации инновационного потенциала предприятий ОПК в условиях рыночной экономики.

К таким принципам относятся: повышение инвестиционной привлекательности инновационных проектов на основе использования инструментов государственного стимулирования; вовлечение федерального и регионального уровней государственного управления в процесс стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК; зависимость форм стимулирования от стадии инновационного процесса; оптимальность соотношения объемов стимулирования инновационной деятельности, предоставляемых на возвратной и безвозвратной основе [3].

Стимулирование инновационной деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса может осуществляться посредством использования

различных форм (финансовых, экономических, налоговых) [2; 4–6].

С целью выявления отличительных особенностей проведен анализ форм стимулирования, позволивший выявить специфику каждой из форм в зависимости от основы предоставления (возвратная и безвозвратная), периода, на который предоставляется форма стимулирования, условий предоставления; стоимости предоставляемой формы стимулирования (табл. 1).

Проведенный анализ существующих форм стимулирования показал, что все они отличаются друг от друга характером и целями предоставления. Использование тех или иных форм не исключает друг друга. В зависимости от поставленных целей и задачи в основу классификации могут быть положены различные признаки.

Реализация сформулированных принципов стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК требует систематизации имеющихся форм стимулирования, позволяющих выделить однородные классы с точки зрения поставленных задач. Иными словами, классификационные признаки должны учитывать условия, особенности и задачи инновационного развития предприятий оборонно-промышленного комплекса.

В связи с этим формы стимулирования предлагается классифицировать по следующим признакам:

- 1) состав стадий инновационного процесса;
- 2) субъект стимулирования инновационной деятельности;
- 3) способ стимулирования (на возвратной и безвозвратной основе);
- 4) форма получения доходов бюджетами на федеральном и региональном уровнях государственного управления, осуществляющими стимулирование инновационной деятельности.

В табл. 2 представлены результаты классификации форм стимулирования инновационной деятельности.

Отдельные стадии инновационного процесса могут быть профинансированы из разных источников. Так, в соответствии с ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» № 127 от 23.08.1996, с изменениями, внесенными от 06.11.2011 № 291-ФЗ, финансовое обеспечение инновационной деятельности основывается на множественности источников финансирования и может осуществляться за счет различных уровней бюджета, посредством финансирования организаций, осуществляющих научную, научно-техническую, инновационную деятельность [7].

Такая же ситуация свойственна и для стимулирования инновационной деятельности. Объемы стимулирования предоставляются как федеральными, так и региональными уровнями государственного управления.

Как правило, федеральный уровень государственного управления берет на себя часть расходов, связанных с реализацией инновационной деятельности (программ, проектов) на всех стадиях инновационного процесса.

Но вместе с тем за счет средств федерального уровня государственного управления осуществляется стимулирование начальных стадий инновационного процесса (фундаментальные исследования, научно-исследовательские разработки) посредством следую-

щих форм: субсидии; дотации; субвенции; льготы по видам налога (освобождение от уплаты налога на добавленную стоимость выполнения НИОКР; освобождение от налога на прибыль доходов от операций по реализации акций инновационного сектора экономики); другие формы стимулирования.

Региональные органы государственного управления, которые в большей степени связаны с коммерциализацией результатов, осуществляют стимулирование инновационной деятельности преимущественно на возвратной основе посредством таких форм, как бюджетный кредит, государственные гарантии, субсидии на возмещение части затрат, отсрочка и рассрочка по уплате налогов, инвестиционный налоговый кредит.

Осуществление инновационной деятельности характеризуется рисками вложений, величина которых зависит от стадий инновационного процесса. В связи с этим возникает необходимость введения такого классификационного признака, как *способ стимулирования инновационной деятельности (на возвратной и безвозвратной основе)*.

Как показал анализ существующих форм стимулирования, на безвозвратной основе оказывается поддержка начальных стадий инновационного процесса посредством предоставления дотаций, грантов, субсидий, субвенций.

По мере перехода к стадиям разработок и коммерциализации результатов инновационной деятельности меняется способ предоставления объемов стимулирования. Стимулирование на стадиях, связанных с коммерциализацией, осуществляется посредством форм, предоставляемых на возвратной основе: налоговые льготы (отсрочка и рассрочка по уплате налогов, инвестиционный налоговый кредит); бюджетный кредит; бюджетные инвестиции в уставный капитал (объекты государственной собственности).

Вместе с тем существуют такие формы, которые предоставляются на безвозвратной основе: субсидии на возмещение части затрат по уплате процентов за пользование кредитами; субсидии на возмещение части затрат по уплате лизинговых платежей; субсидии на возмещение части затрат на коммерциализацию инновационных разработок; субсидии на возмещение части затрат, связанных с подготовкой пакета документов, необходимого для участия инновационных проектов в федеральных и международных программах и (или) получения финансирования; субсидии на возмещение части затрат на приобретение новых средств в рамках технического перевооружения, направленного на производство инновационной продукции; субсидии на возмещение части затрат на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ; сокращение налогооблагаемого дохода от ассигнований на исследования и разработки вне зависимости от полученного результата (отрицательный или положительный); льготное налогообложение дивидендов, полученных за акции инновационных организаций, а также формы, предусматривающие вариантность основы предоставления: льготы по аренде недвижимого имущества (возврат предоставленного имущества в случае его нецелевого использования), отсрочка и рассрочка по уплате налогов.

Таблица 1

Особенности форм стимулирования инновационной деятельности

Форма	Класс форм	Особенности		
		Условия предоставления	Период, на который предоставляется форма стимулирования	Стоимость предоставляемых форм стимулирования
Субсидии*	БО	Дефицит бюджета субъекта или местного бюджета не должен превышать 10 % утвержденного общего годового объема доходов бюджета субъекта. Нарушение предельных значений долга	Срок не менее 3 лет	
Субвенции				
Дотации				
Бюджетные инвестиции в уставный капитал	ВО	Предоставление технико-экономического обоснования и проектно-сметной документации со стороны предприятия, плана передачи земли или сооружений, договора между юридическим лицом и органами исполнительной власти. Отсутствие оформленных договоров служит основанием для блокировки бюджетных инвестиций	Предоставляются на соответствующий год и плановый период	Не менее 25 % доли в уставном капитале предприятия должна принадлежать государству
Гранты	БО	Условия и критерии отбора устанавливаются грантодателем в зависимости от тематики конкурса	От 1 года до 3 лет	
Государственные гарантии	БО	Не предоставляется при нарушении условий: доля в уставном капитале не менее 10 %; отсутствует просроченная задолженность по налогам и иным обязательным платежам; не возбуждено дело о банкротстве; общий объем государственной поддержки, оказываемой РФ либо субъектами РФ, по осуществляемому им проекту в различных формах не должен превышать 75 % полной стоимости проекта	Срок определяется исходя из установленного условиями кредитного договора срока исполнения обеспечиваемых гарантией обязательств, увеличенного на 70 дней	
Бюджетный кредит	ВО	При неспособности заемщика обеспечить исполнение обязательств по возврату кредита не предоставляется. Предоставляется субъектам, не имеющим просроченной задолженности перед соответствующим бюджетом, по обязательным платежам в бюджетную систему	До 12 месяцев. Возможна пролонгация. Устанавливается при утверждении бюджета	Предприятия обязаны вернуть кредит и проценты в установленные сроки
Субсидии на возмещение части затрат по уплате лизинговых платежей	БО	Предоставляются субъектам, не имеющим просроченной задолженности перед соответствующим бюджетом, по обязательным платежам в бюджетную систему	Устанавливаются законами субъектов (в среднем 2 года)	
Субсидии на возмещение части затрат на коммерциализацию инновационных разработок	БО	Соответствие перечню затрат, связанных с коммерциализацией инновационных разработок (технологий, продуктов, услуг)	Устанавливаются законами субъектов (текущий финансовый год и плановый период)	
Субсидии на возмещение части затрат, связанных с подготовкой пакета документов для участия инновационных проектов в программах	БО	Соответствие перечню подлежащих субсидированию затрат, связанных с подготовкой пакета документов, необходимого для участия инновационных проектов в федеральных и международных программах	Устанавливаются законами субъектов (текущий финансовый год и плановый период)	

Форма	Класс форм	Особенности		
		Условия предоставления	Период, на который предоставляется форма стимулирования	Стоимость предоставляемых форм стимулирования
Субсидии на возмещение части затрат по погашению процентной ставки по кредитам	БО	Предоставляются субъектам, не имеющим просроченной задолженности перед соответствующим бюджетом, по обязательным платежам в бюджетную систему. Заключение организацией кредитного договора с российской кредитной организацией. Продукция отнесена к инновационной согласно критериям, утвержденным правительством субъекта. Отсутствие процедуры банкротства и ликвидации на дату подачи заявления. Доля выручки от реализации продукции составляет не менее 50 % в общей сумме выручки за год, предшествующий году подачи заявления	Устанавливаются законами субъектов (в среднем 2 года)	
Субсидии на возмещение части затрат на приобретение новых основных средств	БО	Предоставляются субъектам, не имеющим просроченной задолженности перед соответствующим бюджетом, по обязательным платежам в бюджетную систему. Подтверждение фактически произведенных затрат на приобретение основных средств. Приобретенное основное средство должно быть поставлено на бухгалтерский учет	Устанавливаются законами субъектов (в среднем 2 года)	
Субсидии на возмещение части затрат на проведение НИОКР	БО	Предоставляются субъектам, не имеющим просроченной задолженности перед соответствующим бюджетом, по обязательным платежам в бюджетную систему. Предприятие относит произведенные расходы на НИОКР к расходам в соответствии с бухгалтерским учетом РФ. Предприятие проводит НИОКР самостоятельно	Устанавливаются законами субъектов (в среднем 2 года)	
Льготы по аренде недвижимого имущества*	БО	Представление документов, подтверждающих соответствие субъектов, осуществляющих инновационную деятельность, условиям, установленным Федеральным законом, и условиям, предусмотренным федеральными и региональными программами	Устанавливаются законами субъектов	
Инвестиционный налоговый кредит	ВО	Предоставляется предприятиям при наличии хотя бы одного из следующих оснований: проведение организацией НИОКР; осуществление организацией внедренческой или инновационной деятельности; выполнение особо важного заказа по социально-экономическому развитию региона; выполнение организацией ГОЗ	От 1 года до 5 лет	Сумма кредита, начисляемые на сумму кредита проценты
Отсрочка и рассрочка по уплате налогов*	ВО	Предоставляется в следующих случаях: причинение предприятию ущерба в результате обстоятельств непреодолимой силы; непредоставление (несвоевременное предоставление) бюджетных ассигнований; угроза возникновения признаков несостоятельности предприятия в случае единовременной уплаты им налога; производство и (или) реализация товаров, работ или услуг предприятием носит сезонный характер; при наличии оснований для предоставления отсрочки или рассрочки по уплате налогов, подлежащих уплате в связи с перемещением товаров через таможенную границу	От 1 года до 5 лет	Сумма задолженности налоговых обязательств. В отдельных случаях сумма налоговых обязательств и начисленные на указанную сумму проценты
Льготы по видам налога*	БО	Льготы применяются ко всем налогоплательщикам, осуществляющим инновационную деятельность, и в отношении компаний, являющихся резидентами технико-внедренческих особых экономических зон (технопарков) при наличии соответствующих лицензий на осуществление деятельности, договоров и других подтверждающих документов	Предоставляются в течение срока осуществления инновационной деятельности (по отдельным видам налога освобождение от уплаты до 5 лет)	

Таблица 2

Классификация форм стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК

Форма	Признак	Стадии ИП	Субъект стимулирования			Способ стимулирования		Форма получения доходов в бюджет			
			ФБ	РБ	МБ	ВО	БО	%	Н	Д	ДС
Субсидии*		ФИ	+				+				
		НИР	+				+				
		ОКР									
		К									
Субвенции*		ФИ	+	+			+				
		НИР	+	+			+				
		ОКР									
		К									
Дотации		ФИ	+	+			+				
		НИР	+	+			+				
		ОКР									
		К									
Бюджетные инвестиции в уставный капитал		ФИ									
		НИР									
		ОКР	+	+		+			+	+	
		К	+	+		+			+	+	
Гранты		ФИ	+	+			+				
		НИР	+	+			+				
		ОКР									
		К									
Бюджетный кредит		ФИ									
		НИР									
		ОКР	+			+		+	+		
		К	+			+		+	+		
Государственные гарантии		ФИ									
		НИР									
		ОКР	+	+			+		+		
		К	+	+			+		+		
Льготы по аренде недвижимого имущества		ФИ									
		НИР									
		ОКР		+			+		+		
		К		+			+		+		
Субсидии на возмещение части затрат по уплате процентов		ФИ									
		НИР									
		ОКР		+	+		+		+		
		К		+	+		+		+		
Субсидии на возмещение части затрат по уплате лизинговых платежей		ФИ									
		НИР									
		ОКР		+	+		+		+		
		К		+	+		+		+		
Субсидии на возмещение части затрат на коммерциализацию инновационных разработок		ФИ									
		НИР									
		ОКР		+	+		+		+		
		К		+	+		+		+		
Субсидии на возмещение части затрат, связанных с подготовкой пакета документов		ФИ									
		НИР									
		ОКР		+	+		+		+		
		К		+	+		+		+		

Форма / Признак	Стадии ИП	Субъект стимулирования			Способ стимулирования		Форма получения доходов в бюджет			
		ФБ	РБ	МБ	ВО	БО	%	Н	Д	ДС
Субсидии на возмещение части затрат на приобретение новых средств в рамках технического перевооружения, направленного на производство инновационной продукции	ФИ									
	НИР									
	ОКР		+	+		+		+		
	К		+	+		+		+		
Субсидии на возмещение части затрат на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ	ФИ									
	НИР		+	+		+		+		
	ОКР		+	+		+		+		
	К		+	+		+		+		
Инвестиционный налоговый кредит	ФИ									
	НИР	+	+	+	+		+	+		
	ОКР	+	+	+	+		+	+		
	К									
Отсрочка и рассрочка по уплате налогов*	ФИ									
	НИР									
	ОКР	+	+	+	+			+		
	К	+	+	+	+			+		
Льготы по видам налога	ФИ	+								
	НИР	+	+			+				
	ОКР		+	+		+				
	К		+	+		+				

Примечание. ИП – инновационный процесс; ФИ – фундаментальные исследования; НИР – научно-исследовательские разработки; ОКР – опытно-конструкторские работы; К – стадия коммерциализации инновационного проекта; ФБ – бюджет федерального уровня государственного управления; РБ – бюджет регионального уровня государственного управления; МБ – бюджет местных административно-территориальных образований; ВО – возвратная основа предоставления объемов стимулирования; БО – безвозвратная основа предоставления объемов стимулирования; % – получение дохода в форме процентов; Д – доход в форме дивидендов; Н – доход в форме налоговых поступлений; ДС – доход в денежной форме.

Использование стимулирования, предоставляемого на возвратной и безвозвратной основе, позволяет реализовать эффект финансового рычага, для оценки которого возникает необходимость деления форм стимулирования инновационной деятельности по такому признаку, как *форма получения доходов бюджетами на федеральном и региональном уровнях государственного управления, осуществляющими стимулирование инновационной деятельности.*

Формы стимулирования на возвратной основе обеспечивают не только достижение поставленных целей, на которые предоставляются средства, но и получение дохода в различных формах (налоговые поступления, дивиденды, проценты и др.).

Вне зависимости от способа предоставления формы стимулирования доходом всегда будут налоговые платежи, уплачиваемые предприятиями, осуществляющими инновационную деятельность.

Такие формы стимулирования, как бюджетный кредит, государственные гарантии, субсидии на возмещение части затрат, изменение сроков уплаты на-

логов и другие формы, обеспечивают получение дохода в виде налоговых поступлений.

Кроме того, предоставление бюджетного кредита, инвестиционного налогового кредита предполагает получение дохода не только в виде налоговых поступлений, но и в виде выплаты процентов. Такая форма, как вложение инвестиций в уставный капитал, дополнительно обеспечивает получение дохода в виде дивидендов.

Предоставляемые государством формы стимулирования (как федеральным, так и региональными уровнями управления) способствуют инновационной активности предприятий, осуществляющих инновационную деятельность. Группировка существующих форм по предложенным признакам позволяет выделить классы, отличающиеся целями, условиями и способом стимулирования, посредством реализации которых возможно решить задачу эффективного стимулирования инновационной деятельности промышленных предприятий, устойчивого инновационного развития и их конкурентоспособности.

Библиографические ссылки

1. Министерство финансов РФ : офиц. сайт. URL: www.minfin.ru/.
2. Министерство экономического развития РФ: офиц. сайт. URL: <http://fcpr.vpk.ru/>.
3. Саакян А. М. Стимулирование инновационной деятельности предприятий ОПК: принципы и инструменты выбора форм // Современные технологии управления. 2012. № 4 (16) [Электронный ресурс]. URL: <http://sovman.ru>.
4. Бюджетный кодекс Российской Федерации : федер. закон от 31.07.1998 № 145-ФЗ [ред. от 03.12.2012 № 378-ФЗ, с изм. от 21.11.2012 № 327-ФЗ]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».
5. Налоговый кодекс Российской Федерации. Часть первая и вторая от 03.05.2012 № 47-ФЗ, с изм. от 07.12.2012 № 417-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».
6. Красноярский край : офиц. портал. URL: <http://www.krskstate.ru>.
7. О науке и государственной научно-технической политике [Электронный ресурс] : федер. закон от 23.08.1996 № 127-ФЗ [ред. от 06.11.2011 № 291-ФЗ]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».

References

1. *Ministerstvo finansov Rossiyskoy Federatsii. Ofits. sayt* [Ministry of Finance of the Russian Federation. Official site]. Available at: www.minfin.ru/.

2. *Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya RF. Ofits. sayt* [Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Official site]. Available at: <http://fcpr.vpk.ru/>.

3. Saakyan A. M. [Promoting innovation defense enterprises : principles and tools to choose the form]. *Sovremennye tekhnologii upravleniya* [Modern control technology]. 2012, no. 4 (16). Available at: <http://sovman.ru>.

4. *Byudzhetyi kodeks Rossiiskoi Federatsii, feder. zakon* [Budget Code of the Russian Federation, federal. Law] of 31.07.1998 № 145 –FZ, Ed. from 03.12.2012 N 378-FZ, as amended. from 21.11.2012 № 327 -FZ]. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=133288;fld=134;dst=100466;rnd=0.22284947675810152>.

5. *Nalogovyi kodeks Rossiiskoi Federatsii.* [Tax Code of the Russian Federation]. The first part and the second from 03.05.2012 № 47-FZ, as amended. from 07.12.2012 № 417-FZ. Available at: <http://www.consultant.ru/popular/nalog1/>.

6. *Krasnoyarskiy kray, ofits. portal* [Krasnoyarsk region, official. portal]. Available at: <http://www.krskstate.ru>.

7. *O nauke i gosudarstvennoi nauchno-tekhnicheskoi politike* [Science and State Science and Technology Policy]. Federal. Law of 23.08.1996 № 127-FZ, Ed. from 06.11.2011 № 291-FZ. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=152448>.

© Ерыгин Ю. В., Саакян А. М., 2013

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешечкин Андрей Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем, Сибирский федеральный университет. E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru.

Анкудинов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Ахмедова Шахназ Агасувар кызы – магистрант института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shahnaz@inbox.ru.

Базанова Екатерина Петровна. E-mail: bazanova_ekaterina@mail.ru.

Башков Иван Валерьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 89135562380.

Брестер Кристина Юрьевна – магистрант института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: abahachy@mail.ru.

Буряченко Владимир Викторович – ассистент кафедры ИВТ, Сибирский государственный университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gamernewb@yandex.ru.

Варганов Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: svarganov@unr.edu.

Васильев Евгений Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: ven@icm.krasn.ru.

Вашкевич Алексей Вячеславович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex23-5@yandex.ru.

Веселков Сергей Александрович – директор обсерватории, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Высотин Максим Александрович – лаборант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: cianol@mail.ru.

Гасанова Татьяна Олеговна – магистр прикладной математики и информатики, аспирант научной группы «Диалоговые системы» института телекоммуникационных технологий, Ульмский университет, Германия. E-mail: tatiana.gasanova@uni-ulm.de.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Гончарук Андрей Витальевич – ведущий инженер, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru.

Горяшин Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gorkolya@mail.ru.

Грачёв Егор Александрович – выпускник кафедры ЭВМ, Вятский государственный университет. E-mail: rook.mail@mail.ru.

Денисенко Валерий Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: denisen@icm.krasn.ru.

Деревянко Валерий Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, руководитель научно-исследовательской группы «Тепловые системы космических аппаратов», Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: dv@icm.krasn.ru.

Елисеева Наталья Сергеевна – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nataxa1.09@mail.ru.

Емельянов Данил Витальевич – инженер-конструктор 1 категории, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Еремина Анастасия Денисовна – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: wollen07@yandex.ru.

Ермолаев Максим Владимирович – инженер 1-й категории, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ermakc@iss-reshetnev.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: erygin@sibsau.ru.

Жереб Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Сибирский федеральный университет. E-mail: vprzhereb@rambler.ru.

Жуков Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com.

Жуков Евгений Алексеевич – студент магистратуры кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zhukov.krsk@gmail.com.

Заблоцкий Сергей Геннадьевич – магистр системного анализа и управления, аспирант кафедры диалоговых систем института телекоммуникационных технологий, Ульмский университет, Германия. E-mail: sergey.zablotskiy@uni-ulm.de.

Зайковский Дмитрий – доктор-инженер, дважды магистр, дипломированный инженер. В 2013 защитил докторскую диссертацию по теме «Оптимизация клиентно-серверной архитектуры в контексте распределенных речевых диалоговых систем» в университете города Ульма, Германия. E-mail: dmitry.zaykovskiy@uni-ulm.de.

Замай Анна Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: annazamay@yandex.ru.

Замай Сергей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, главный специалист, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: sergey-zamay@yandex.ru.

Звонков Владимир Борисович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vladimirzvonkov802@yandex.ru.

Зеленков Павел Викторович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Золотарев Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: amida@land.ru.

Зорин Егор Иванович – выпускник кафедры ЭВМ, Вятский государственный университет. E-mail: cvc575@gmail.com.

Зув Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Ивасев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ivasev@sibsau.ru.

Ислентьев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, начальник группы, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Казанцев Михаил Александрович – начальник отдела автоматизации систем управления производством, ОАО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь». E-mail: mkaz@mail.ru.

Калякин Данил Сергеевич – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dskalyakin@mail.ru.

Карасева Маргарита Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, ректор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: info@sibsau.ru.

Колмыков Владимир Афанасьевич – кандидат технических наук, профессор, генеральный директор, ОАО «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: kras@krasmail.ru.

Коломенцев Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры ракетных двигателей, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru.

Корнет Мария Евгеньевна – соискатель, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: maria4business@mail.ru.

Краснов Павел Олегович – старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Краснова Дарья Александровна – аспирант, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: krasnova-d@mail.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; главный научный сотрудник отдела машиноведения, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузнецов Александр Борисович – инженер отдела материаловедения ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kusnezov@iss-reshetnev.ru

Кузовников Александр Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; начальник управления, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ujub@list.ru.

Кузубов Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Лапухин Евгений Геннадьевич – инженер обсерватории, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: slovoktk@mail.ru.

Легалов Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: legalov@mail.ru.

Лубкин Иван Александрович – старший преподаватель кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lubkin@rambler.ru.

Лукьяненко Михаил Васильевич – профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-sau@mail.ru.

Лыхин Александр Олегович – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru.

Марарескул Дмитрий Иванович – начальник сектора, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Матковский Иван Васильевич – старший преподаватель, Сибирский федеральный университет. E-mail: alpha900i@mail.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru.

Минкер Вольфганг – дважды доктор-инженер, профессор и ассоциативный директор института техники связи университета г. Ульма (Германия). E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Мурогин Александр Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Надараина Константин Вахтангович – аспирант, Дальневосточный федеральный университет; институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук. E-mail: nadaraiaqv@mail.ru.

Надараина Цезари Гергиевич – кандидат технических наук, главный конструктор ООО «КВОНТ».

Оборин Лев Александрович – кандидат технических наук, профессор, советник генерального директора по науке и технике, ОАО «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: kras@krasmail.ru.

Овчинников Андрей Викторович – начальник отдела систем ориентации и стабилизации (935), ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Панфилов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: crook_80@mail.ru.

Попов Алексей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, директор института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vm_popov@sibsau.ru.

Попов Евгений Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eropov@bmail.ru.

Попов Захар Иванович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zipcool@bk.ru.

Раводина Дарья Владимировна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Раевский Валентин Анатольевич – доктор технических наук, главный специалист по разработке систем ориентации и управления космическими аппаратами, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. Тел. 8-913-550-27-27.

Ростовцев Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ЭВМ, Вятский государственный университет. E-mail: rostov_kirov@mail.ru.

Рыжиков Иван Сергеевич – аспирант института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Саакян Аревик Мансовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: arevik.saakyan@inbox.ru.

Семенкин Евгений Станиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru.

Семенкина Мария Евгеньевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Семенкина Ольга Евгеньевна – бакалавр прикладной математики и информатики, магистрант кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oleese@mail.ru.

Семенкина Ольга Эрнестовна – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Сергиенко Роман Борисович – кандидат технических наук, старший исследователь научной группы «Диалоговые системы» института телекоммуникационных технологий, Ульмский университет, Германия. E-mail: romaserg@list.ru.

Середин Александр Игоревич – аспирант кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alexzanderIV@yandex.ru.

Сержантова Мария Викторовна – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры информационно-управляющих систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sunrise.86@mail.ru.

Сидоров Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет. E-mail: sidorovalex83@gmail.com.

Сидоров Максим Юрьевич – магистр системного анализа и управления, научный сотрудник и аспирант кафедры диалоговых систем института телекоммуникационных технологий, университет города Ульма, Германия. E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Синицкий Дмитрий Евгеньевич – инженер-конструктор, ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: Dimasik77@yandex.ru.

Соболь Александр Степанович – начальник информационно-технического отдела, ОАО «КБ «Искра». E-mail: alexander.so8ol@gmail.com.

Сомов Виктор Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: somov56@bk.ru.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Спирина Анастасия – аспирант кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: s_nastia@mail.ru.

Становов Владимир Вадимович – магистрант института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Тентилов Юрий Александрович – начальник сектора систем ориентации и стабилизации (9352), ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Толстомятов Михаил Игоревич – ассистент кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kam1kag3e@mail.ru.

Ультес Штефан – дипломированный инженер, аспирант кафедры диалоговых систем Университета города Ульма (Германия). E-mail: stefan.ultes@uni-ulm.de.

Фадеев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: fadeev.77@mail.ru.

Фатеев Алексей Владимирович – инженер 2 категории, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mr.fateev@inbox.ru.

Федоров Александр Семенович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex99@iph.krasn.ru.

Харламов Валерий Анатольевич – ведущий инженер отдела материаловедения ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru.

Хоменко Игорь Иванович – оператор вакуумных установок, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com.

Хохлов Алексей Николаевич – аспирант кафедры ракетных двигателей, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); младший научный сотрудник, Центральный научный исследовательский институт машиностроения. E-mail: alexey.hohlov.86@gmail.com.

Храпунова Валерия Владимировна – магистрант кафедры системного анализа и исследования операций; начальник отдела научно-исследовательской работы студентов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nirs@sibsau.ru.

Хритonenko Дмитрий Иванович – магистрант института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: hdmity.91@mail.ru.

Черноусов Алексей Владимирович – аспирант кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; инженер, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: avchernousov@iss-reshetnev.ru.

Чернятина Анастасия Александровна – начальник группы отдела материаловедения, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: Trp@iss-reshetnev.ru.

Шабалов Андрей Андреевич – кандидат технических наук, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени М. Ф. Решетнева. E-mail: shabalovandrey@mail.ru.

Шестаков Иван Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени М. Ф. Решетнева. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Шилова Мария Евгеньевна – студентка, Сибирский федеральный университет. E-mail: shilovamashka@mail.ru.

Шудрак Максим Олегович – аспирант кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: slender.bit@mail.ru.

Яковлев Евгений Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yei@nm.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmedova Shakhnaz Agasuvar kyzy – Master's Degree student of Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: shahnaz@inbox.ru.

Aleshechkin Andrei Mikhajlovich – Doctor of Engineering Sciences, associate professor, head of the department of Radio Electronic Systems, Siberian Federal University. E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru.

Ankudinov Alexander Vladimirovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev.

Bashkov Ivan Valerjevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev.

Bazanova Ekaterina Petrovna. E-mail: bazanova_ekaterina@mail.ru.

Brester Christina Yuryevna – Master's Degree student of Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: abahachy@mail.ru.

Buryachenko Vladimir Viktorovich – teaching assistant of the department of computer sciences, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: gamernewb@yandex.ru.

Chernousov Alexey Vladimirovich – Engineer of JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems“. Graduate student of Siberian State Aerospace University, electronics and telecommunications department. E-mail: avchernousov@iss-reshetnev.ru.

Chernyatina Anastasiya Alexandrovna – manager of the group of the department of materials science, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: Trp@iss-reshetnev.ru.

Denisenko Valery Vasilievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading researcher, Institute of Computational Modelling of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. E-mail: denisen@icm.krasn.ru.

Derevyanko Valeriy Aleksandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, Head of the Research Group “Spacecraft Heat Systems”, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: dv@icm.krasn.ru.

Eliseeva Natalya Sergeevna – engineer, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: nataxa1.09@mail.ru.

Emelyanov Danil Vitalyevich – engineer-constructor of the first category, JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev”.

Eremina Anastasiya Denisovna – engineer, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: wollen07@yandex.ru.

Ermolaev Maxim Vladimirovich – engineer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: ermakc@iss-reshetnev.ru.

Erygin Yriy Vladimirovich – Doctor of Economics, professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: erygin@sibsau.ru.

Fadeev Alexander Aleksandrovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of the department of principles of machines construction, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: fadeev.77@mail.ru.

Fateev Aleksey Vladimirovich – engineer of the second category, JSC “Information Satellite Systems” named after academician M.F. Reshetnev”. E-mail: mr.fateev@inbox.ru.

Fedorov Alexander Semenovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: alex99@iph.krasn.ru.

Gasanova Tatyana Olegovna – Master's Degree student of the department of applied mathematics and informatics, postgraduate student of the research group of dialogue systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: tatiana.gasanova@uni-ulm.de.

Girn Alexey Vasiljevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of the department of space vehicles, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: girn007@gmail.com.

Goncharuk Andrey Vitaljevich –senior engineer, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru.

Goryashin Nikolay Nikolaevich – Candidate of Engineering Science, associate professor of Automatic Control Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: gorkolya@mail.ru.

Grachev Egor Aleksandrovich – graduate of Vyatka State University. E-mail: rook.mail@mail.ru.

Islientev Evgenii Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, workgroup manager, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”.

Ivasev Sergey Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of the department of quality and certification, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ivasev@sibsau.ru.

Kaliakin Danil Sergeevich – engineer, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dskalyakin@mail.ru.

Karaseva Margarita Vladimirovna – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of the department of system and operation analysis, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

Kazantsev Mikhail Aleksandrovich – Head of the department of automation of control systems by production, Open joint stock company “Radiosvyaz Scientific and production enterprise”. Email: mkaz@mail.ru.

Kharlamov Valery Anatoljevich – leading engineer of the department of materials science, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru.

Khokhlov Alexey Nicolaevich – postgraduate student of the department of rocket engines, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: alexey.hohlov.86@gmail.com.

Khomenko Igor Ivanovich – mechanic of vacuum sets, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com.

Khrapunova Valeriya Vladimirovna – Master’s Degree student of the department of system and operation analysis; manager of the department of student’s scientific research department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: nirs@sibsau.ru.

Khritonenko Dmitriy Ivanovich – Master’s Degree student of Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: hdmityr.91@mail.ru.

Kolmykov Vladimir Afanasyevich – Candidate of Engineering Science, professor, Director General of Open joint-stock company “Krasnoyarsk machine-building plant”. E-mail: kras@krasmail.ru.

Kolomentsev Alexander Ivanovich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Professor of the department of rocket engines, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: a.i.kolomentsev@yandex.ru.

Kornet Maria Evgenjevna – degree-seeking student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: maria4business@mail.ru.

Kovalev Igor Vladimirovich – Doctor of Engineering Science, rector, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: info@sibsau.ru.

Krasnov Pavel Olegovich – senior researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Krasnova Darya Alexandrova – postgraduate student, Institute of Computational Modelling of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. E-mail: krasnova-d@mail.ru.

Krushenko Genrikh Gavrilovich – Doctor of Engineering Sciences, professor of the department of rocket engines, senior researcher of Institute of Computational Modelling SB RAS, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kuznetsov Alexander Borisovich – engineer of the department of materials science, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: kusnezov@iss-reshetnev.ru.

Kuzovnikov Alexandr Vitalievich – PhD in technical science. Head of department of “Academician M.F. Reshetnev “Information Satellite Systems“. Docent of Siberian State Aerospace University, Space information systems department. E-mail: ujub@list.ru.

Kuzubov Alexander Alexandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Lapukhin Evgenii Genadievich – engineer of observatory of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: slovoktk@mail.ru.

Legalov Alexander Ivanovich – Doctor of Engineering Science, Professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: legalov@mail.ru.

Lubkin Ivan Aleksandrovich – senior lecturer, Department of Information Technology Security, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: lubkin@rambler.ru.

Lukyanenko Mikhail Vasiljevich – Professor, Head of the Department “Automatic Control Systems”, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sibgau-sau@mail.ru.

Lykhin Aleksandr Olegovich – engineer, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru.

Marareskul Dmitrii Ivanovich – sector manager, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”.

Matkovsky Ivan Vasiljevich – senior lecturer, Siberian Federal University. E-mail: alpha900i@mail.ru.

Medvedev Alexander Vasiljevich – Doctor of Engineering Science, professor of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru.

Mikheev Anatoly Egorovich – Doctor of Engineering Sciences, professor, chief of the department of space vehicles, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: michla@mail.ru.

Minker Wolfgang – twice Doctor of Engineering Science, professor and associative director of the Institute of communication technique of the University of Ulm (Germany). E-mail: wolfgang.minker@uni-ulm.de.

Murigin Alexander Vladimirovich – Doctor of Engineering Science, chair of the department of information-operating systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: avm514@mail.ru.

Nadaraia Cezari Gergievich – Candidate of Engineering Science, General constructor, “CVONT” LLC.

Nadaraia Konstantinje Vahtangovich – postgraduate student, Far Easter Federal University; Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: nadaraiakv@mail.ru.

Oborin Lev Aleksandrovich – Doctor of Engineering Science, professor, the adviser of the General director for science and technology, Open joint-stock company “Krasnoyarsk machine-building plant”. E-mail: kras@krasmail.ru.

Ovchinnikov Andrey Victorovich – head of pointing systems department (935), JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev”.

Panfilov Iliia Aleksandrovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of System Analysis and Operations Research Department, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: crook_80@mail.ru.

Popov Alexey Mikhailovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, director of the Institute of Informatics and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vm_popov@sibsau.ru.

Popov Evgeny Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the department of system analysis and research of operations, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: epopov@bmail.ru.

Popov Zakhar Ivanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research scientist, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zipcool@bk.ru.

Raevskii Valentin Anatoljevich – Doctor of Engineering Sciences, Chief Specialist in the development of systems of orientation and control of space vehicles, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”.

Ravodina Darya Vladimirovna – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Rostovtcev Vladimir Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Vyatka State University. E-mail: rostov_kirov@mail.ru.

Ryzhikov Ivam Sergeevich – graduate student of the department of system analysis and operation research, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Saakian Arevik Maisovna – Candidate of Economic Sciences, associate professor of Finance and Credit department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: arevik.saakyan@inbox.ru.

Semenkin Evgeny Stanislavovich – Doctor of Engineering Science, professor, professor of the department of system analysis and research of operations, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: eugeneseamenkin@yandex.ru.

Semenkina Maria Evgenyevna – Candidate of Engineering Science, senior lecturer of the department of high mathematics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Semenkina Olga Ernestovna – Doctor of Engineering Science, professor of the department of system analysis and research of operations, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: semenkina.olga@mail.ru.

Semenkina Olga Evgenyevna – Bachelor of applied mathematics and informatics, Master’s Degree student of the department of system analysis and research of operations, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: oleese@mail.ru.

Seredin Alexander Igorevich – postgraduate student, the department of system and operation analysis. E-mail: alexzanderIV@yandex.ru.

Sergienko Roman Borisovich – Candidate of Engineering Science, senior researcher of the research group of dialogue systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: romaserg@list.ru.

Serzhantova Mariya Victorovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior teacher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sunrise.86@mail.ru.

Shabalov Andrey Andriyovych – Candidate of Engineering Science. E-mail: shabalov-andrey@mail.ru.

Shestakov Ivan Jakovlevich – Candidate of Engineering Science, associate professor, Professor of the department of electrical engineering and telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Shilova Maria Evgenyevna – student of Siberian Federal University. E-mail: shilovamashka@mail.ru.

Shudrak Maksim Olegovich – postgraduate student, Information Security Department, Siberian State Aerospace University named after M.F. Reshetnev. E-mail: slender.bit@mail.ru.

Sidorov Alexander Sergeevich – Candidate of Engineering Science, associate professor of Automatic Control Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sidorovalex83@gmail.com.

Sidorov Maxim Yuryevich – Master's Degree student of the department of system analysis and management, postgraduate student of the department of dialogue systems of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: maxim.sidorov@uni-ulm.de.

Sinitskiy Dmitry Evgenyevich – structural engineer, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: Dimasik77@yandex.ru.

Sobol Alexander Stepanovich – CIO of JSC "KB "Iskra". E-mail: alexander.so8ol@gmail.com.

Somov Viktor Grigorievich – Doctor of technical science. Professor of Siberian State Aerospace University, electronics and telecommunications department. E-mail: somov56@bk.ru.

Sopov Evgeny Aleksandrovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of System Analysis and Operations Research Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Spirina Anastasia – postgraduate student of the department of system analysis and operation research, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: s_nastia@mail.ru.

Stanovov Vladimir Vadimovich – Master's Degree student of Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Tentilov Uriy Aleksandrovich – head of pointing systems sector (9352), JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev".

Tolstopyatov Mikhail Igorevich – teaching assistant of the department of space vehicles Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kam1kag3e@mail.ru.

Ultes Stefan – licensed engineer, graduate student of the chair of dialogue systems of the University of Ulm (Germany). E-mail: stefan.ultes@uni-ulm.de.

Ultes Stefan – licensed engineer, postgraduate student of the department of dialogue systems of the University of Ulm (Germany). E-mail: stefan.ultes@uni-ulm.de.

Varganov Sergey Alexandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: svarganov@unr.edu.

Vashkevich Alexey Vyacheslavovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: alex23-5@yandex.ru.

Vasilyev Evgeniy Nikolaevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: ven@icm.krasn.ru.

Veselkov Sergej Aleksandrovich – director of observatory of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Visotin Maxim Alexandrovich – laboratory assistant, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. E-mail: cianol@mail.ru.

Yakovlev Eugenij Iosiphovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, associate professor of the department of higher mathematics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: yei@nm.ru.

Zablotskiy Sergey Genadyevich – Master's Degree student of the department of system analysis and management, postgraduate student of the dialogue systems department of the Institute of Communications Engineering, University of Ulm (Germany). E-mail: sergey.zablotskiy@uni-ulm.de.

Zamay Anna Sergeevna – Candidate of Biological Sciences, associate professor, Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky. E-mail: annazamay@yandex.ru.

Zamay Sergey Sergeevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, main specialist, Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky. E-mail: sergey-zamay@yandex.ru.

Zaykovskiy Dmitry – Doctor of Engineering, double master of science, graduate engineer. In 2013 he defended doctoral dissertation titled "Optimization of the client-server architecture for spoken language dialogue system" in University of Ulm, Ulm, Germany. E-mail: dmitry.zaykovskiy@uni-ulm.de.

Zelenkov Pavel Viktorovich – Candidate of Engineering Sciences, manager of the scientific research department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Zhereb Vladimir Pavlovich – Doctor of Engineering Science, professor, Head of the department of Siberian Federal University. E-mail: vpzhereb@rambler.ru.

Zhukov Eugene Alekseevich – Master's Degree student of the department of system analysis and operation research, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zhukov.krsk@gmail.com.

Zhukov Vadim Gennadyevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of Information technologies security department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com.

Zolotarev Vyacheslav Vladimirovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, Department of Information Technology Security, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: amida@land.ru.

Zorin Egor Ivanovich – graduate of Vyatka State University. E-mail: cvc575@gmail.com.

Zuev Alexander Alexandrovich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Zvonkov Vladimir Borisovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: vladimirzvonkov802@yandex.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Буряченко В. В. Алгоритм стабилизации видеопоследовательности, основанный на построении нечеткой модели движения	4
Васильев Е. Н., Деревянко В. А. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов	9
Денисенко В. В., Замай С. С., Замай А. С. Математическое моделирование электрофореза живых клеток в многоэлектродном устройстве	13
Жуков В. Г., Вашкевич А. В. Модифицированное безопасное скалярное произведение в конфиденциальном кластерном анализе k-means с вертикальным секционированием данных	18
Звонков В. Б., Попов А. М. Сравнительное исследование классических методов оптимизации и генетических алгоритмов	23
Казанцев М. А. Система диспетчеризации опытного и мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры	27
Калякин Д. С., Варганов С. А., Лыхин А. О., Кузубов А. А., Краснов П. О. Квантово-химическое изучение процесса связывания молекулярного водорода активным центром [NiFe]-гидрогеназы	32
Ковалев И. В., Середин А. И., Карасева М. В., Зеленков П. В., Храпунова В. В. Построение частотных словарей на основе исходных текстов с применением лемматизации	39
Корнет М. Е. О непараметрической идентификации системы управления конвертерной плавкой	41
Краснова Д. А. Преобразования эквивалентности уравнений движения двумерного слоя идеальной жидкости	46
Лапухин Е. Г., Веселков С. А. Новые переменные звезды, выявленные по наблюдениям обсерватории СибГАУ в марте-апреле 2013 года	49
Легалов А. И., Матковский И. В., Анкудинов А. В. Особенности хранения функционально-поточковых параллельных программ	53
Медведев А. В. О некоторых исследованиях по системному анализу	57
Панфилов И. А., Базанова Е. П., Сопов Е. А. Исследование эффективности работы генетического алгоритма оптимизации с альтернативным представлением решений	68
Ростовцев В. С., Зорин Е. И., Грачёв Е. А. Модулярные высокоточные параллельные вычисления с использованием нейросетевых технологий	71
Соболев А. С. Построение и адаптация NewSQL СУБД в частном «облаке»	75
Черноусов А. В., Кузовников А. В., Сомов В. Г. Оценка устойчивости широкополосных сигналов к имитационным помехам	81
Шудрак М. О., Золотарев В. В., Лубкин И. А. Методика динамического анализа уязвимостей в бинарном коде	84
Яковлев Е. И. Об аналитическом продолжении кратного степенного ряда с помощью m -однородных полиномов матричным методом в обобщенную звезду Миттаг-Леффлера	87

2-я Международная конференция по математическим моделям и их применению

Ахмедова Ш. А., Семенкин Е. С. Новый коллективный метод оптимизации на основе кооперации бионических алгоритмов	92
Брестер К. Ю., Семенкин Е. С. Разработка адаптивного генетического алгоритма для многокритериального проектирования нейросетевых моделей	99
Гасанова Т. О., Сергиенко Р. Б., Минкер В., Семенкин Е. С. Категоризация документов коэволюционным генетическим алгоритмом	104
Гасанова Т. О., Сергиенко Р. Б., Минкер В., Жуков Е. А. Новый метод решения задачи маршрутизации вызовов на естественном языке	108
Хритonenко Д. И., Семенкин Е. С. Распределенный самонастраивающийся эволюционный алгоритм для проектирования искусственных нейронных сетей	112
Попов Е. А., Семенкина М. Е. Самоконфигурируемый алгоритм генетического программирования для задач медицинской диагностики	116

Рыжиков И. С. О повышении эффективности алгоритма эволюционных стратегий для решения задачи оптимального управления непрямым методом	123
Семенкин Е. С., Шабалов А. А. Интеллектуальные информационные технологии в прогнозировании временных рядов	128
Семенкина О. Е., Попов Е. А., Семенкина О. Э. Самоконфигурирующийся эволюционный алгоритм для решения задачи коммивояжера	134
Сидоров М. Ю., Заблоцкий С. Г., Минкер В., Семенкин Е. С. Распознавание эмоций и идентификация спикера по речевым сигналам	139
Спирина А. В., Заблоцкий С. Г., Сидоров М. Ю. Двухуровневая система поиска схожих слов для эффективной и надежной автоматической конкатенации слогов русской речи	144
Становов В. В., Семенкин Е. С. Самонастраивающийся эволюционный алгоритм для автоматизированного формирования систем на нечеткой логике	148
Ультес Ш., Минкер В. Качество взаимодействия: обзор	153
Зайковский Д. О согласовании ошибок передачи в распределенных системах распознавания речи	156

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Гончарук А. В., Лукьяненко М. В., Раевский В. А. Определение возмущающего момента при экспериментальной отработке системы наведения антенн космического аппарата	162
Ермолаев М. В., Марарескул Д. И., Ислентьев Е. В., Алешечкин А. М. Бортовая оптико-радиолокационная система	167
Зуев А. А., Толстомятов М. И. Теплоотдача в каверне газовой турбины ЖРД	172
Коломенцев А. И., Хохлов А. Н. Планирование испытаний и построение регрессионных моделей удельного импульса тяги жидкостных ракетных двигателей тягой от 10 до 420 Н	177
Надараина Ц. Г., Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Надараина К. В. Энергетическая установка космического аппарата с вращающимися аккумуляторными батареями	182
Сидоров А. С., Горяшин Н. Н. Система электропитания для наземной спутниковой станции	187
Синицкий Д. Е., Мурыгин А. В. Вопросы технической реализации динамического стенда для исследования работы двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации КА	193
Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентилов Ю. А., Овчинников А. В., Лукьяненко М. В. Алгоритмы определения курсового угла для вычисления фазового центра антенны космического аппарата «ГЛОНАСС» на участках упреждающего разворота	198

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Елисеева Н. С., Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Высотин М. А. Теоретическое исследование диффузии лития в поверхностных слоях диоксидов титана и олова	204
Еремина А. Д., Кузубов А. А., Варганов С. А., Лыхин А. О., Сержантова М. В. Исследование влияния природы лигандов на связывание молекулярного водорода с половинной моделью активного центра [NiFe]-гидрогеназы	208
Крушенко Г. Г. Нанометаллическое топливо для ракетных двигателей	212
Лыхин А. О., Кузубов А. А., Варганов С. А., Сержантова М. В., Елисеева Н. С. Определение активного пространства метода самосогласованного поля для описания активных центров металлопротеинов	217
Михеев А. Е., Гирн А. В., Харламов В. А., Чернятина А. А., Хоменко И. И. Разработка технологии нанесения радиоотражающих покрытий	222
Михеев А. Е., Ивасев С. С., Кузнецов А. Б., Башков И. В., Раводина Д. В. Испытания образцов радиоотражающих покрытий на стойкость к внешним воздействующим факторам	227
Оборин Л. А., Колмыков В. А., Жереб В. П., Шилова М. Е. Совершенствование технологии литых деталей турбонасосного агрегата силовых установок летательных аппаратов с помощью системы компьютерного моделирования LVM Flow CV	231

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Ерыгин Ю. В., Саакян А. М. Формы стимулирования инновационной деятельности предприятий ОПК: анализ и классификация	238
Сведения об авторах	245

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Buryachenko V. V. A video stabilization algorithm based on the construction of a fuzzy motion model	4
Vasilyev E. N., Derevyanko V. A. The analysis of thermoelectric module efficiency in the cooling systems	9
Denisenko V. V., Zamay S. S., Zamay A. S. Mathematical simulation of electrophoresis of live cells by multielectrode device	13
Zhukov V. G., Vashkevich A. V. A modified secure dot product in the privacy-preserving k-means clustering with the vertical partitioning data	18
Zvonkov V. B., Popov A. M. Comparative investigation of classical optimization methods and genetic algorithms	23
Kazantsev M. A. The system of the pilot and small-scale production scheduling of the radio-electronic equipment	27
Kaliakin D. S., Varganov S. A., Lykhin A. O., Kuzubov A. A., Krasnov P. O. Quantum-chemical study of molecular hydrogen binding on [NiFe]-hydrogenase active site	32
Kovalev I. V., Seregin A. I., Karaseva M. V., Zelenkov P. V., Khrapunova V. V. Frequency dictionary construction based on the source text using lemmatization	39
Kornet M. E. About the nonparametric identification of the oxygen-converter steelmaking control system	41
Krasnova D. A. Transformations of the equivalence of the movement equations of a two-dimensional layer of ideal liquid	46
Lapukhin E. G., Veselkov S. A. The new variable stars discovered in the observatory of SibSAU in march-april, 2013	49
Legalov A. I., Matkovsky I. V., Ankudinov A. V. Peculiarities of the functional dataflow parallel program storage	53
Medvedev A. V. About system analysis and operation research theory	57
Panfilov I. A., Bazanova E. P., Sopov E. A. Investigation of the genetic algorithm with an alternative representation of solutions	68
Rostovtsev V. S., Zorin E. I., Grachev E. A. Residual high-precision parallel computing with using of neural networks	71
Sobol A. S. Design & adaptation NewSQL DBMS in the private «cloud»	75
Chernousov A. V., Kuzovnikov A. V., Somov V. G. The assessment of broadband signals immunity against simulation echoes	81
Shudrak M. O., Zolotarev V. V., Lubkin I. A. The technique for binary executables vulnerabilities detection	84
Yakovlev E. I. About analytical continuation of the multiple power series with the m -homogeneous polynomial matrix method to the generalized star Mittag-Leffler	87

2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ON MATHEMATICAL MODELS AND ITS APPLICATIONS

Akhmedova Sh., Semenkin E. New optimization metaheuristic based on co-operation of biology related algorithms	92
Brester C. Yu., Semenkin E. S. Development of adaptive genetic algorithms for neural network models multicriteria design	99
Gasanova T. O., Sergienko R. B., Minker W., Semenkin E. S. Text categorization by coevolutionary genetic algorithm	104
Gasanova T. O., Sergienko R. B., Minker W., Zhukov E. A. A new method for natural language call routing problem solving	108
Khritonenko D. I., Semenkin E. S. Distributed self-configuring evolutionary algorithms for artificial neural networks design	112
Popov E. A., Semenkina M. E. Self-configuring genetic programming algorithm for medical diagnostic problems	116
Ryzhikov I. S. About performance improvement of evolutionary strategies technique applied to optimal control problem indirect method	123
Semenkin E. S., Shabalov A. A. Intelligent information technologies in time series forecasting	128
Semenkina O. E., Popov E. A., Semenkina O. E. Self-configuring evolutionary algorithms for travelling salesman problem	134

Sidorov M., Zablotskiy S. G., Minker W., Semenkin E. S. Emotion recognition and speaker identification from speech	139
Spirina A., Zablotskiy S. G., Sidorov M. Yu. Two-steps system in searching similar words for fast and reliable automatic concatenation of Russian sub-word units	144
Stanovov V. V., Semenkin E. S. Self-adjusted evolutionary algorithms based approach for automated design of fuzzy logic systems	148
Ultes S., Minker W. Interaction quality: a review	153
Zaykovskiy D. On the concealment of transmission errors for distributed speech recognition systems	156

PART 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Goncharuk A. V., Lukyanenko M. V., Raevsky V. A. Evaluation of the antenna pointing system disturbing moment in the experimental process	162
Ermolaev M. V., Marareshkul D. I., Islentev E. V., Aleshechkin A. M. An onboard optical and radar system	167
Zuev A. A., Tolstoplyatov M. I. Heat transfer in the cavity of a gas turbine liquid rocket engine	172
Kolomentsev A. I., Khokhlov A. N. The design of the experiment and creation of the regression model of the specific impulse liquid rocket engine thrust from 10 to 420 N	177
Nadaraia C. G., Chestakov I. Y., Fadejev A. A., Nadaraia K. V. Propulsion of a spacecraft with the rotating batteries	182
Sidorov A. S., Goryashin N. N. Power supply system for standalone satellite communication terminal	187
Sinitskiy D. E., Murigin A. V. The questions of technical realization of the dynamic bench for the research of the activity of the engine-flywheel of the attitude control system and space vehicle stabilization	193
Fateev A. V., Emelyanov D. V., Tentilov U. A., Ovchinnikov A. V., Lukyanenko M. V. Algorithms of the course corner definition of the space vehicle "GLONASS" on the sites of the anticipatory turn on the board and in the equipment of the consumer for the calculation of the aerial phase center	198

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Eliseeva N. S., Popov Z. I., Fedorov A. S., Kuzubov A. A., Visotin M. A. Theoretical investigation of lithium diffusion on the surface and subsurface layers of titanium dioxide and tin dioxide	204
Eremina A. D., Kuzubov A. A., Varganov S. A., Lykhin A. O., Serzhantova M. V. Influence of the ligands on the molecular hydrogen binding with a half-model of the [NiFe]-hydrogenase active site	208
Krushenko G. G. Nanometallic fuel for the rocket engines	212
Lykhin A. O., Kuzubov A. A., Varganov S. A., Serzhantova M. V., Eliseeva N. S. The choice of the active space for multiconfigurational self-consistent-field in the description of the metalloproteins active sites	217
Miheev A. E., Girn A. V., Harlamov V. A., Chernyatina A. A., Homenko I. I. The development of the coatings technology application radioreflective coatings	222
Miheev A. E., Ivasev S. S., Kyzhetov A. B., Bachkov I. B., Ravodina D. V. Tests of samples radioreflective coatings hardness to external factors	227
Oborin L. A., Kolmykov V. A., Zhereb V. P., Shilova M. E. Improvement of the technology of castings turbopump assembly aircraft power plants using the computer simulation system LVM Flow CV	231

PART 4. ECONOMICS

Erygin U. V., Saakian A. M. Forms of stimulation of innovative activity of defense industry enterprises: analysis and classification	238
Information about the authors	250

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Вестник СибГАУ»

Общие требования. Тексты представляются в редакцию в электронном и печатном виде. Оригинал должен быть чистым, не помятым, без правок, вписанных от руки. Страницы нумеруются карандашом на обороте.

Печатный оригинал должен полностью совпадать с электронным вариантом статьи.

Файлы со статьями принимаются на CD-диске, флешке (без вирусов) или по электронной почте.

Статьи в распечатанном виде авторы сдают лично секретарю журнала или высылают по почте с указанием обратного адреса (для иногородних).

ВНИМАНИЕ! На последней странице обязательно ставится **подпись автора(ов)** статьи.

Количество авторов одной статьи не более 5-ти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

Электронная копия. Статья набирается в программе **Microsoft Office Word 2003!**

Содержание. В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения.

Статья должна заканчиваться выводом. Текст вывода набирается отдельным абзацем (абзацами), в котором акцентируется новизна результатов, эффективность их использования и др.

Объем статьи: 3–8 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 1–2 страницы.

Параметры страницы. Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт – Times New Roman, размер 12 пт.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

При представлении научной статьи в журнал «Вестник СибГАУ» необходимо придерживаться **следующей схемы:**

Блок 1 – на русском языке:

- название статьи (по центру жирным шрифтом прописными буквами);
- автор(ы) (по центру строчными буквами);
- адресные данные авторов (организация(и), адрес организации(й), электронная почта всех или одного автора);
- аннотация (авторское резюме);
- ключевые слова.

Блок 2 – информация Блока 1 в романском алфавите (транслитерация¹ и перевод соответствующих данных) в той же последовательности: авторы на латинице (транслитерация); заглавие, аннотация, ключевые слова, название организации, адрес организации – на английском языке.

Блок 3 – полный текст статьи на русском или другом языке (язык оригинала).

Блок 4 – Список литературы с русскоязычными ссылками на русском языке по ГОСТ 5.0.7 (для статей на русском языке).

Блок 5 – Список литературы с русскоязычными и другими ссылками в романском алфавите.

Название списка литературы должно быть на английском языке: REFERENCES, но ни в коем случае не транслитерированным: SPISOK LITERATURY.

Аннотация. Аннотация должна состоять минимум из 100–250 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк) и включать следующие аспекты содержания статьи:

- предмет, тему, цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы;
- область применения результатов;
- выводы.

Аннотация на английском языке на русскоязычную статью по объему может быть больше аннотации на русском языке (но не более 850 знаков), так как за русскоязычной аннотацией идет полный текст на этом же языке.

¹ Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

Основной текст статьи размещается через пробел от резюме. Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается. Внутренние подзаголовки статьи центрировать.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Ссылки на использованные в статье источники заключают в квадратные скобки и последовательно нумеруют, например [1].

Примечания: 1. Смысловые пояснения основного текста или дополнения к нему оформляются в виде внутритекстовых примечаний среди строк основного текста специальной рубрикой, выделенной светлым курсивом: *Примечание:* (одно примечание), *Примечания:* (несколько примечаний). Отделяются от текста точкой (если стоят в единственном числе в подбор к тексту примечания).

Примечания должны быть последовательно пронумерованы.

2. При наличии гранта ссылка на грант помещается внизу полосы под строками основного текста (подстрочное примечание).

Формулы. Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов. Специальные сложные символы, а также многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Math Type. Набор математических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

- размеры символов определяются стандартными установками Math Type (Размер – Определить – Заводские),

- русские и греческие символы – прямым шрифтом,

- латинские – курсивом.

Формулы, набранные отдельными строками, располагают по центру.

Не допускается (!) набор в основном тексте статьи простых латинских, греческих или специальных символов в редакторе формул.

Таблицы должны быть последовательно пронумерованы. Слово «таблица» набирается светлым курсивом с выравниванием вправо, шрифтом 11, например, *Таблица 1* ниже – заглавие таблицы (набирается жирным шрифтом по центру). Если таблица имеет большой объем, она может быть помещена на отдельной странице, а в том случае, когда она имеет значительную ширину – на странице с альбомной ориентацией.

Иллюстрации. Иллюстрации и подписи к ним должны быть вставлены в текст статьи и дополнительно прикреплены отдельным файлом любого распространенного графического формата (например, .jpg, .bmp, .tiff и т. п.). Иллюстрации последовательно пронумеровываются обычным шрифтом без кавычек с выравниванием по центру, например, Рис. 1. Могут содержать подрисовочную подпись, шрифтом 11 пт. Рисунки могут быть сканированы с оригинала (в этом случае они должны быть четкими, контрастными, без лишнего фона) или выполнены средствами компьютерной графики. Цветные иллюстрации не принимаются.

К печатному варианту статьи необходимо приложить:

1. **Экспертное заключение** о возможности открытой публикации.

2. **Внешнюю рецензию** (рецензент не ниже ученой степени доктора наук).

3. **Сведения об авторе** предоставляются на русском и английском языках и оформляются в следующей последовательности:

- фамилия, имя, отчество (полностью);

- ученая степень, звание;

- должность, место работы;

- вуз, год его окончания;

- область научных интересов;

- e-mail;

- номер телефона;

- адрес для переписки (для иногородних).

В сведениях об авторах нельзя использовать аббревиатуры и сокращения.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются.

Оформление библиографических ссылок в романском алфавите (references)

1. Не использовать разделительные знаки: /; //; –.
2. Следовать правилам, позволяющим легко идентифицировать 2 основных элемента описаний – авторы и источники.
3. Не перегружать ссылки транслитерацией* заглавий статей либо давать их совместно с переводом.
4. Придерживаться единой системы транслитерации фамилий авторов, заглавий статей (если их включать) и названий источников (<http://translit.ru/>, выбрать **BGN**).
5. При ссылке на статьи из российских журналов, имеющих переводную версию, лучше давать ссылку на переводную версию статьи.

Название источника, независимо от того, журнал это, монография, сборник статей или название конференции, *выделяется курсивом*. Дополнительная информация – перевод на английский язык названия источника приводится в круглых скобках шрифтом, используемым для всех остальных составляющих описания.

Примеры описаний **статей из российских журналов** (фамилии авторов в транслитерации, название журнала в транслитерации курсивом, год, №, страницы. Название статьи опускается):

Dyachenko V. D., Krivokolysko S. G., Nesterov V. N. *Khim. Geterotsikl. Soedin.*, 1996, no. 9, p. 1243.

Polyanchikov Yu. N., Bannikov A. I. *Vestnik SibGAU*. 2007, no. 1 (23), p. 21–24.

Статьи из электронных журналов описываются аналогично печатным изданиям с дополнением данных об адресе доступа. Пример описания статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange, *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2, available at: [www. ascusc.org/ jcmc/vol5/ issue2/](http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/)

Наиболее точную идентификацию статей из электронных журналов можно получить, если указать уникальный идентификатор, который используют практически все ведущие зарубежные журналы для идентификации своих статей (Digital Object Identifier – DOI), в том числе и российские переводные журналы. Система DOI является международным ISO стандартом (<http://www.doi.org/>). Поэтому при наличии в статье DOI, в списке литературы желательно указывать ее идентификатор. Примеры описания статей из SCOPUS, имеющих DOI:

Yang S. Y., Ryu I., Kim H. Y., Kim J. K., Jang S. K., Russell T. P. Nanoporous membranes with ultrahigh selectivity and flux for the filtration of viruses (2006) *Advanced Materials*, 18 (6), p. 709–712. Cited 89 times. doi: 10.1002/adma.200501500.

Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micromachining (2008) *Russian Journal of Electrochemistry*, 44 (8), pp. 926-930. Cited 2 times. doi: 10.1134/S1023193508080077.

Материалы конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing [Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma Cove resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i*

* Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

povysheniya neftegazootdachi” (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, p. 267–272.

Главное в описаниях конференций – название конференции на языке оригинала (в транслитерации, если нет ее английского названия), выделенное курсивом. В скобках дается перевод названия на английский язык. Выходные данные (место проведения конференции, место издания, страницы) должны быть представлены на английском языке.

Возможен и такой сокращенный вариант:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “ovye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi*” (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, pp. 267–272.

В переводных журналах ссылки на публикации в материалах конференций даются либо вообще без их заглавий докладов, либо приводится только их перевод. Примеры ссылок на публикации в материалах конференций:

Antina E. V., Berezin M. B., Semeikin A. S., Dudina N. A., Yutanova S. L., and Guseva G. B. Abstracts of Papers, *XII Molodezhnaya konferentsiya po organicheskoi khimii* (XII Youth Conference on Organic Chemistry), Suzdal, 2009, p. 248.

Iznairov B. M. *Obespechenie ratsional'nykh geometricheskikh parametrov mnogozvennykh soedinenii i rezervirovanie ikh elementov* (Rational Geometric Parameters of Multicomponent Joints and Backup of Their Components), Saratov: SGTU, 2008.

Riabinina A. A., Berezina E.V. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* (Materials XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy conference Reshetnev reading), Krasnoyarsk, 2010, p. 100–115.

Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii (White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology). Moscow, LKI, 2007.

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'tvo SSSR* (Last government of the USSR). Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union (*Ot katastrofy k vrozozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR*). Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R. D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.

Latyshev, V.N., *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov* (Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting), Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009.

Ссылка на Интернет-ресурс:

APA Style (2011), Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov (Rules for the Citing of Sources) Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed 7 February 2011).

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристатейных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard reference system) практически для всех видов публикаций – <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>, а также программные средства для их формирования. Можно воспользоваться этими рекомендациями.