

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2(93)/2018

2(93)/2018

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAYUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder
«Information and Control Systems», Ltd.

Publisher
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Editor-in-Chief
M. Sergeev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief
E. Krouk
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

Executive secretary
O. Muravtsova

Editorial Council
C. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA
L. Fortuna
PhD, Professor, Catania, Italy
A. Fradkov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Ovodenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Y. Podoplyokin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Yu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia
V. Vasilev
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
R. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board
V. Anisimov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
B. Bezruchko
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia
N. Blaustein
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel
A. Dudin
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus
I. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USA
V. Khimenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
G. Maltsev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
G. Matvienko
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, Russia
V. Melekhin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
B. Meyer
PhD, Professor, Zurich, Switzerland
J. Seberry
PhD, Professor, Wollongong, Australia
A. Shalyto
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Shelupanov
Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, Russia
A. Shepeta
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Smirnov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Z. Yuldashev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Zeifman
Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova
Proofreader: T. Zvertanovskaia
Design: M. Chernenko, Y. Umnitsina
Layout and composition: Y. Umnitsina

Contact information
The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaya, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: i-us.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS

Kryukov D. A., Tesker I. A. *Pseudo Number Generation based on Graphic Object Processing* 2

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

Shcherban' I. V., Kirilenko N. E., Shcherban' O. G. *Effective Cost Functions for Spectrum Entropy to Search for High-Frequency Event-Related Patterns in Electrograms with Noise* 8

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

Egorov I. V., Melekhin V. F. *Organizing a Finite State Machine with Higher Resistance to Soft Failures and Soft Failure Registration* 18

Kuchmin A. Yu. *Identification of Non-Stationary Dynamic Objects* 28

SYSTEM AND PROCESS MODELING

Skorokhodov Ya. A., Andreev A. M. *Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification System* 36

Efimov A. A. *Simulation of Sliding Mode Control System for Active Current Converter* 49

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

Gordeev A. V., Gorelik D. V. *Comparative Testing of Container and Hypervisor Virtualizations* 60

Egorova I. S., Itsykson V. M. *Review of Dynamic Methods for Extraction of Partial Software Library Specification* 67

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

Yurkin D. V., Utkina A. A., Pervushin A. O. *Formalized Analysis of Authentication Protocols* 76

INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION

Tatarnikova T. M., Dzubenko I. N. *IoT System for Detecting Dangerous Substances by Smell* 84

Knyazhsky A. Yu. *Synthesis and Accuracy Analysis of Altitude-Above-Sea-Surface Measuring System used on Low-Flying Vehicle* 91

INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION

Grigoryev A. P., Burlutsky S. G., Chernelevsky A. O. *Operator-Navigator Activity Diagnostics System based on Task Approach* 96

Lyamin A. V. *Method of Formal Program Verification for Post Machine Virtual Laboratory* 104

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

115

2(93)/2018

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кристофолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Ю. Ф. Подоплёкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:
В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
И. И. Думер,
д-р наук, проф., Риверсайд, США
А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Г. Г. Матвиенко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Д. Себерри,
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия
А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хищенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына
Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,
сайт: <http://i-us.ru>

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА**Крюков Д. А., Тескер И. А.** Генерация псевдослучайных чисел на основе преобразований графических объектов 2**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ****Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Щербань О. Г.** Эффективные критериальные функции спектральной энтропии для поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных электрограмм 8**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ****Егоров И. В., Мелехин В. Ф.** Способ организации автомата с памятью с повышенной устойчивостью к мягким отказам и регистрацией мягких отказов 18**Кучмин А. Ю.** Проблемы идентификации нестационарных динамических объектов 28**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ****Скорыходов Я. А., Андреев А. М.** Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов 36**Ефимов А. А.** Моделирование системы управления в скользящем режиме активным преобразователем тока 49**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА****Гордеев А. В., Горелик Д. В.** Сравнительное тестирование контейнерной и гипервизорной виртуализации 60**Егорова И. С., Ицыксон В. М.** Обзор динамических методов восстановления частичных спецификаций программных библиотек на основе анализа программных проектов 67**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ****Юркин Д. В., Уткина А. А., Первушин А. О.** Формализованный анализ протоколов аутентификации 76**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ****Татарникова Т. М., Дзюбенко И. Н.** Система детектирования опасных веществ по запаху, построенная на технологии Интернета вещей 84**Княжский А. Ю.** Синтез и анализ точности системы измерения параметров морского волнения, используемой на низколетающем аппарате 91**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ****Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Чернелевский А. О.** Диагностирующая система деятельности оператора-навигатора на основе задачного подхода 96**Лямин А. В.** Метод формальной верификации программ для виртуальной лаборатории «Машина Поста» 104**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

115

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».
© Коллектив авторов, 2018

Сдано в набор 05.03.18. Подписано в печать 23.04.18. Формат 60×84^{1/8}.
Гарнитура SchoolBookС. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,1. Уч.-изд. л. 19,4. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз.). Заказ № 179.
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Отпечатано с готовых диалогитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 15385 — полугодовой индекс.

ГЕНЕРАЦИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Д. А. Крюков^а, канд. техн. наук, dm.bk@bk.ru

И. А. Тескер^а, магистрант, teskerivan.t@gmail.com

^аМосковский технологический университет, Вернадского пр., 78, Москва, 119456, РФ

Постановка проблемы: одним из методов защиты данных является их шифрование. Для шифрования применяются алгоритмы, работа которых предполагает использование случайных или псевдослучайных чисел. Данные числа, критически влияющие на криптостойкость шифра, создаются с помощью генераторов случайных и псевдослучайных чисел. Для того чтобы сгенерированные числа могли использоваться в криптоалгоритмах, они должны иметь признаки истинно случайной последовательности, т. е. быть устойчивыми к реверсивному определению всего потока сгенерированных чисел по известным его частям. **Цель:** разработка метода генерации псевдослучайных чисел, пригодных для дальнейшего использования в криптографических алгоритмах. **Результаты:** представлена методика генерации псевдослучайных чисел, в основе которой лежит процедура обработки изображений методом К-средних и алгоритм вихрь Мерсенна. В качестве источника генерации псевдослучайных чисел предложено применять случайные графические объекты. Приведен пример, визуализирующий результаты работы методики. Новизна подхода состоит в том, что энтропия псевдослучайной величины повышается путем использования преобразованных сведений о графических объектах, обладающих повышенной персонализацией. Полученный алгоритм обладает относительно малой скоростью, но при этом остается относительно устойчивым благодаря уникальным изображениям и двукратному применению алгоритма вихрь Мерсенна. **Практическая значимость:** разработанный метод генерации псевдослучайных чисел может быть использован в криптоалгоритмах, ориентированных в том числе на работу с большими объемами данных.

Ключевые слова — криптография, генератор псевдослучайных чисел, К-метод, обработка изображений, кластеризация, вихрь Мерсенна.

Цитирование: Крюков Д. А., Тескер И. А. Генерация псевдослучайных чисел на основе преобразований графических объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 2–7. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.2

Citation: Kryukov D. A., Tesker I. A. Pseudo Number Generation based on Graphic Object Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 2–7 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.2

Введение

Развитие вычислительных технологий провоцирует возникновение рисков, связанных с повышением уязвимости существующих способов защиты данных. Такие методы защиты информации, как шифрование данных, электронная цифровая подпись, нуждаются в постоянном модифицировании для сохранения своей эффективности. Одним из важнейших компонентов большинства криптографических алгоритмов являются случайные или псевдослучайные числа, формируемые соответствующими генераторами. Данные генераторы способны как сделать зашифрованные данные полностью недоступными для третьих лиц, так и оказаться слабым звеном криптографического алгоритма, существенно снизив его устойчивость к различным атакам.

Вероятностные последовательности

Необходимость использования случайных и псевдослучайных чисел имеется в большинстве криптографических алгоритмов и прикладных

приложений. К примеру, многие криптографические протоколы используют генераторы случайных или псевдослучайных чисел для вспомогательных данных при создании цифровых подписей, векторов инициализации или для иных методов повышения устойчивости шифров.

Существует два базовых алгоритма создания вероятностных последовательностей: генераторы случайных чисел и генераторы псевдослучайных чисел. Фактически результатом обоих алгоритмов являются строки, состоящие из нулей и единиц, которые могут быть впоследствии разделены на подстроки или блоки случайных чисел.

Первый тип — генераторы случайных чисел. Процессы, лежащие в основе генераторов случайных чисел, основаны на анализе естественных процессов, обладающих энтропией, т. е. событий, исход которых заранее неизвестен. Например, такими процессами могут быть вероятностные процессы квантовой физики, дробовой или тепловой шум элементов ЭВМ, на котором будет производиться генерация случайных величин. Зарегистрированные случайные величины, порождаемые данными процессами, после опреде-

ленных математических манипуляций образуют числовую последовательность.

Другим типом является генератор псевдослучайных чисел. Алгоритмы образования псевдослучайных чисел используют так называемые зерна, псевдослучайные числа, являющиеся аналогом данных о случайном процессе у генератора случайных чисел.

Целью вышеописанных алгоритмов является создание последовательности случайных или псевдослучайных чисел. Последовательность, чтобы называться случайной, должна состоять из элементов с одинаковым распределением, при этом элементы этой последовательности должны быть независимы, т. е. изменение значения одного числа не должно влиять на другие элементы [1].

С момента появления необходимости в генерации случайных чисел с достаточной скоростью и в достаточном объеме, чтобы использовать ее в криптографии и других сферах, создано большое количество генераторов как случайных, так и псевдослучайных чисел [2].

Возможно, самый распространенный метод генерации псевдослучайных чисел — конгруэнтный. По сути метод является преобразованием некоего числа формулой вида

$$X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod m,$$

где X — зерно (некое случайное число); a , c , m — некие константы. Данный метод малоэффективен ввиду зависимости последующего элемента генерируемой строки от предыдущего [3].

Другим распространенным алгоритмом генерации псевдослучайных чисел является так называемый вихрь Мерсенна [4–6]. Этот алгоритм построен на числах, именуемых числами Мерсенна. Эти числа образуют последовательность A000668 в Энциклопедии целочисленных последовательностей Нила Слоуна и вычисляются по правилу [7–10] $M_n = 2^n - 1$.

Алгоритм включает в себя регистр сдвига с линейной обратной связью и процесс, именуемый закалкой. Вихрь Мерсенна был разработан японскими учеными Макото Мацумото и Такудзи Нисимура в 1997 г. и с тех пор был существенно модернизирован. Вихрь Мерсенна обладает достаточно высокой скоростью генерации и имеет реализации на многих платформах и языках программирования [11–14].

Вышеперечисленные алгоритмы генерации псевдослучайных чисел имеют относительно простую реализацию, позволяют генерировать большой поток псевдослучайных чисел, однако не обладают криптостойкостью, что делает возможным их применение только как часть более сложного генератора.

Алгоритм генерации псевдослучайных чисел

В качестве составляющей алгоритма генерации псевдослучайных чисел, изложенного в данной работе, предлагается использовать метод K -средних, или K -метод [15–18]. K -метод заключается в группировании неких данных в несколько сплоченных кластеров. В качестве обрабатываемых данных возможно выполнить выборку любых типов данных. В статье предложен алгоритм генерации псевдослучайных чисел на основе преобразований графических материалов — изображений, поскольку изображения удобны для работы с входными данными, что подтверждается следующими объективными обстоятельствами. Во-первых, уникальное изображение (например, снятое камерой смартфона пользователем и сохраненное в памяти аппарата) обладает повышенной персонализацией. Во-вторых, одно изображение способно предоставить достаточно большое количество чисел для дальнейшей обработки (далее — зерен). Например, изображение 128×128 , применяющее цветовой формат RGB, предоставит минимум 49 152 числа, не имеющих прямой зависимости друг от друга и готовых к дальнейшему преобразованию.

Предположим, что в распоряжении алгоритма имеется база уникальных изображений. Наиболее эффективным методом выборки будет применение алгоритма случайной (или псевдослучайной) выборки. Таким образом, первым шагом алгоритма является использование вышеупомянутого вихря Мерсенна. Причиной выбора данного алгоритма является, как было указано ранее, его высокая скорость и большое количество реализаций. На данном этапе от вихря Мерсенна требуется произвести выборку из имеющихся в распоряжении изображений. Снижение энтропии от применения вихря Мерсенна не повлияет на итоговый результат по причине уникальности изображений. Для простоты алгоритма количество изображений выбирается вида N^2 .

После получения N^2 изображений производится преобразование всех изображений к единому размеру: p пикселей на p пикселей на 3 (здесь и далее рассматривается кодирование изображений в формате RGB). Затем производится склейка в один трехмерный массив размерности $(N \times N \times p \times p) \times 3$.

Следующей частью метода генерации псевдослучайных чисел является K -метод. Сначала вихрь Мерсенна случайным образом инициализирует K кластерных точек (центроидов): $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k \in R^n$, которые определяют кластеры имеющейся матрицы данных, состоящей из пикселей изображения. Путем заданного числа итераций эти кластерные точки будут перемещены ближе к геометрическому центру кластеров.

Для каждого i имеем

$$c^i = \arg \min \|x^{(i)} - \lambda_{C_i}\|^2.$$

Для каждого j имеем

$$\lambda_j = \frac{1}{c_k} \sum_{i \in C_k} x^{(i)}.$$

Алгоритм повторяется до полной сходимости процесса кластеризации [19]. Таким образом, получено K центроидов, разделивших трехмерный массив на k групп, не связанных друг с другом. Полученные данные следует преобразовать в массив $(N \times N \times p \times p) \times 3$, затем обработать для упрощения классификации логистической сигмной функцией вида

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (*)$$

Следующим шагом требуется определить итоговые веса значений, с которыми будет производиться бинарная оценка значений массива, а затем преобразовать данные в бинарную строку.

Работа алгоритма генерации псевдослучайных чисел

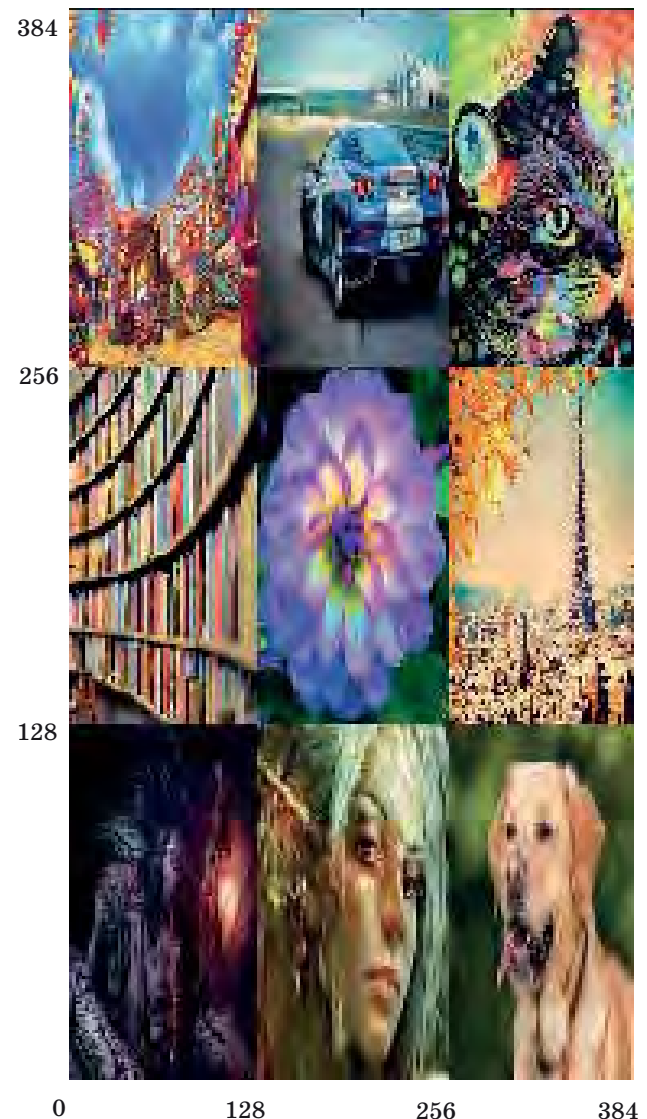
Работа данного алгоритма основана на обработке изображений. Для его эффективности и устойчивости к анализу следует использовать большой объем изображений, однако для примера работы алгоритма применялась случайная выборка, состоящая из девяти изображений (таблица).

- Исходные размеры изображений
- Initial sizes of pictures

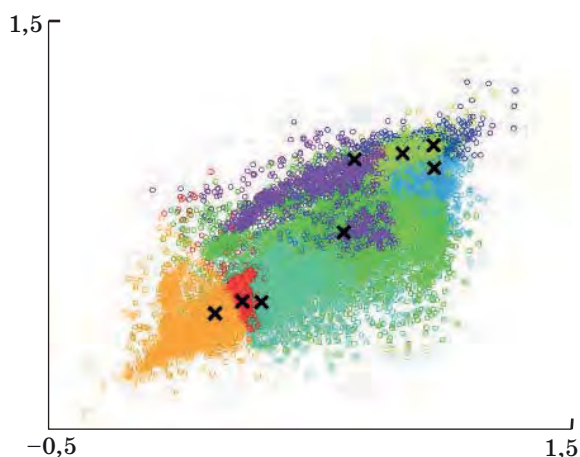
| Образец изображения | Размер |
|---------------------|-------------|
| 1 | 1175×1680×3 |
| 2 | 223×226×3 |
| 3 | 183×275×3 |
| 4 | 720×960×3 |
| 5 | 183×275×3 |
| 6 | 252×200×3 |
| 7 | 1200×1920×3 |
| 8 | 781×1100×3 |
| 9 | 672×896×3 |

В первую очередь, следует определить индексы изображений с помощью алгоритма вихрь Мерсенна. Затем выполнить изменение размера изображений и объединение их в один трехмерный массив. Данные процессы возможно реализовать различными алгоритмами. В настоящей статье использованы методы, предложенные системой математических вычислений Octave [20]. Все изображения сначала приводятся к размеру $128 \times 128 \times 3$, а затем склеиваются в изображение размера $384 \times 384 \times 3$. Результат начального этапа показан на рис. 1.

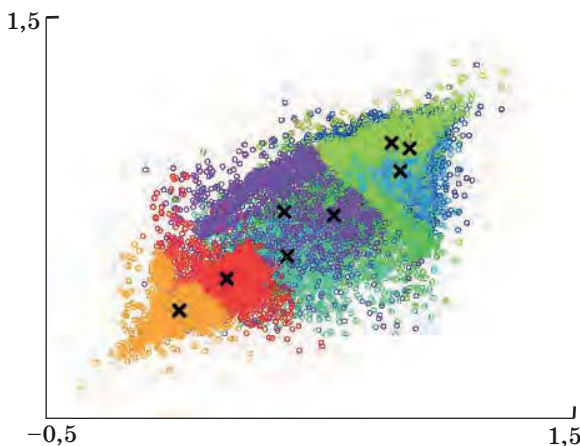
На следующем этапе производится инициализация восьми центроидов с использованием алгоритма вихрь Мерсенна. После инициализации центроидов проводится кластеризация методом K -средних. Оптимальным по соотноше-



■ Рис. 1. Склеенные и сжатые изображения
 ■ Fig. 1. Joint and compressed images



■ **Рис. 2.** Инициализированные центроиды
 ■ **Fig. 2.** Initialized centroids



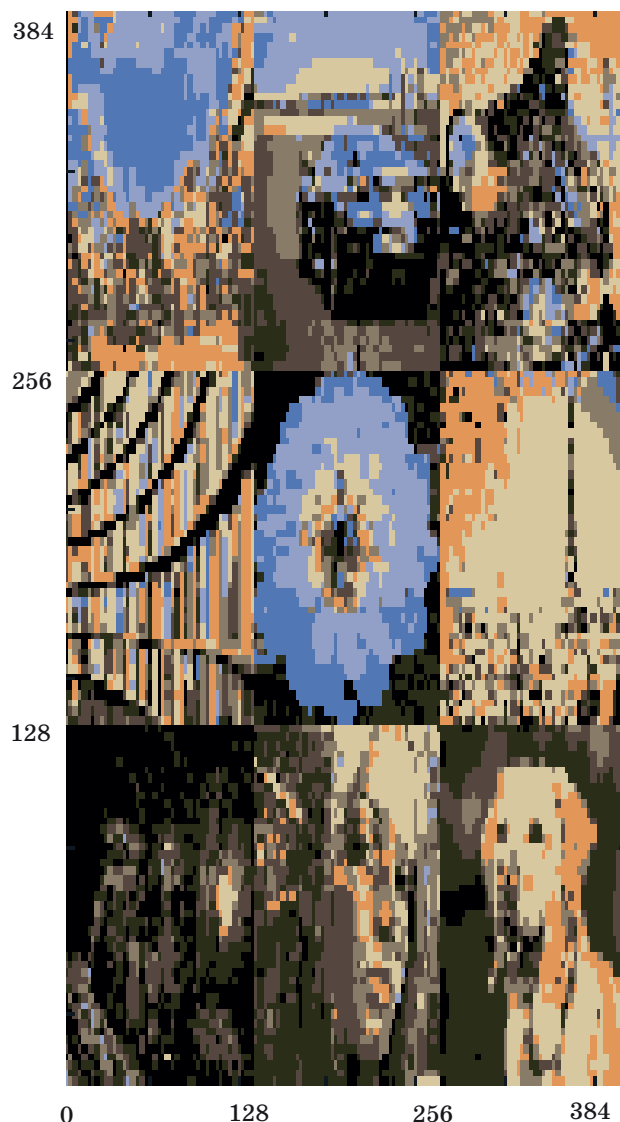
■ **Рис. 3.** Итоговое положение центроидов
 ■ **Fig. 3.** Final centroids positions

нию скорости и кластеризации данных количеством итераций предлагается не более четырех. Начальное положение центроидов показано на рис. 2.

Центроиды после четырех итераций процесса кластеризации (рис. 3) разделили все пиксели нашего изображения на восемь больших кластеров. В зависимости от исходного положения центроидов и количества итераций, которые произведет алгоритм, в каждом из кластеров будут разные пиксели.

После определения кластеров пикселям присваиваются значения, соответствующие ближайшим кластерным точкам (рис. 4).

После получения обновленных данных они преобразуются логистической сигмойдой (*) и объединяются в числовую последовательность. На выходе получается поток длиной 6144 Б, го-



■ **Рис. 4.** Визуализация действия K -метода
 ■ **Fig. 4.** Visualization of K -means algorithm

товый для использования в криптографических алгоритмах.

Заключение

В статье рассмотрен один из методов применения алгоритма вихрь Мерсенна для создания числовых последовательностей. В качестве источника образования зерен использованы графические объекты. Они претерпели изменения методом K -средних для кластеризации значений. В основе метода K -средних также находятся инициализированные алгоритмом вихрь Мерсенна центроиды кластера. Полученная в результате действия данного алгоритма числовая последовательность

может быть задействована в качестве компонентов работы криптографических алгоритмов пользовательских приложений, ориентированных на обмен тестовыми сообщениями и совместное использование медиафайлов. Полученный алго-

ритм, несмотря на относительно малую скорость, обладает относительной устойчивостью благодаря использованию уникальных изображений и двукратному применению алгоритма вихрь Мерсенна.

Литература

1. Rukhin A. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. — Gaithersburg, MD: NIST, 2010. — 131 p.
2. McAndrew A. Introduction to Cryptography with Open-Source Software. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. — 461 p.
3. Menezes A. Handbook of Applied Cryptography. — Boca Raton, FL: CRC Press, 1996. — 780 p.
4. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne Twister: a 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator // Journal ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 1998. Vol. 8. Iss. 1. P. 3–30.
5. Mersenne Twister Home Page. <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/m-mat/MT/emt.html>. (дата обращения: 21.10.2017).
6. Cleve's Corner: Cleve Moler on Mathematics and Computing. <http://blogs.mathworks.com/cleve/2015/04/17/random-number-generator-mersenne-twister> (дата обращения: 20.04.2017).
7. Schroeder M. Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise. — N. Y.: W H Freeman and Company, 1991. — 429 p.
8. On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. <http://oeis.org/A000668> (дата обращения: 10.11.2017).
9. Schroeder M. Number Theory in Science and Communication. — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — 431 p.
10. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 2–14. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
11. Octave-forge. <https://octave.sourceforge.io/octave/function/randperm.html> (дата обращения: 20.10.17).
12. Python Standard Library. <https://docs.python.org/3/library/random.html> (дата обращения: 20.10.2017).
13. Class MersenneTwister. <http://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.3/org/apache/commons/math3/random/MersenneTwister.html> (дата обращения: 20.10.2017).
14. Haskell Documentation. <https://hackage.haskell.org/package/mersenne-random-1.0.0.1/docs/System-Random-Mersenne.html> (дата обращения: 20.10.2017).
15. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. — Berlin: Springer, 2006. — 738 p.
16. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. — Berlin: Springer, 2010. — 812 p.
17. Cord M., Cunningham P. Machine Learning Techniques for Multimedia: Case Studies on Organization and Retrieval. — Berlin: Springer Science & Business Media, 2008. — 289 p.
18. Petrosino A. Progress in Image Analysis and Processing. — Berlin: Springer, 2013. — 766 p.
19. CS 229 Machine Learning Course Materials. <http://cs229.stanford.edu/materials.html> (дата обращения: 25.10.2017).
20. Quarteroni A., Saleri F., Gervasio P. Scientific Computing with MATLAB and Octave. — Berlin: Springer Science & Business Media, 2014. — 450 p.

UDC 004.421.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.2

Pseudo Number Generation based on Graphic Object Processing

Kryukov D. A.^a, PhD, Tech., dm.bk@bk.ru

Tesker I. A.^a, Master Student, teskerivan.t@gmail.com

^aMoscow Technological University, 78, Vernadskogo Av., 119456, Moscow, Russian Federation

Introduction: Data are often protected by encryption with algorithms using random or pseudo-random numbers. These numbers, which critically affect the cryptographic strength of the cipher, are created by generators of random or pseudorandom numbers. In order to use the generated bits in crypto algorithms, they must have the characteristics of a truly random sequence, i.e. be resistant to reverse engineering of the entire flow of generated numbers by its known fragments. **Purpose:** Developing a method for generating pseudo-random numbers suitable for further use in cryptographic algorithms. **Results:** The paper presents a method for generating pseudo-random numbers based on the K-method and Mersenne twister. As a source for generating pseudo-random numbers, we propose to use random graphic objects. An example is given, visualizing the results of the method. The novelty of our approach is that the entropy of a pseudo-random value is increased by using transformed information about graphic objects with enhanced personalization. The resulting algorithm has a relatively low speed, but it is highly stable due to the use of unique images and double use of Mersenne

twister algorithm. **Practical relevance:** The developed method of generating pseudo-random numbers can be used in crypto algorithms, including those operating with large amounts of data.

Keywords — Cryptography, Pseudo Random Number Generator, K-method, Image Processing Clustering, Mersenne Twister.

Citation: Kryukov D. A., Tesker I. A. Pseudo Number Generation based on Graphic Object Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 2–7 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.2

References

1. Rukhin A. *A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications*. Gaithersburg, MD, NIST, 2010. 131 p.
2. McAndrew A. *Introduction to Cryptography with Open-Source Software*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2016. 461 p.
3. Menezes A. *Handbook of Applied Cryptography*. Boca Raton, FL, CRC Press, 1996. 780 p.
4. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne Twister: a 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. *Journal ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 1998, vol. 8, iss. 1, pp. 3–30.
5. *Mersenne Twister Home Page*. Available at: <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/m-mat/MT/emt.html> (accessed 21 October 2017).
6. *Cleve's Corner: Cleve Moler on Mathematics and Computing*. Available at: <http://blogs.mathworks.com/cleve/2015/04/17/random-number-generator-mersenne-twister> (accessed 20 April 2017).
7. Schroeder M. *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. New York, W H Freeman and Company, 1991. 429 p.
8. *On-Line Encyclopedia of Integer Sequences*. Available at: <http://oeis.org/A000668> (accessed 10 November 2017).
9. Schroeder M. *Number Theory in Science and Communication*. Berlin, Springer-Verlag, 2009. 431 p.
10. Balonin N. A., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard Matrices *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 2–14 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
11. *Octave-forge*. Available at: <https://octave.sourceforge.io/octave/function/randperm.html> (accessed 20 October 2017).
12. *Python Standard Library*. Available at: <https://docs.python.org/3/library/random.html> (accessed 20 October 2017).
13. *Class MersenneTwister*. Available at: <http://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.3/org/apache/commons/math3/random/MersenneTwister.html> (accessed 20 October 2017).
14. *Haskell Documentation*. Available at: <https://hackage.haskell.org/package/mersenne-random-1.0.0.1/docs/System-Random-Mersenne.html> (accessed 20 October 2017).
15. Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Berlin, Springer, 2006. 738 p.
16. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Berlin, Springer, 2010. 812 p.
17. Cord M., Cunningham P. *Machine Learning Techniques for Multimedia: Case Studies on Organization and Retrieval*. Berlin, Springer Science & Business Media, 2008. 289 p.
18. Petrosino A. *Progress in Image Analysis and Processing*. Berlin, Springer, 2013. 766 p.
19. *CS 229 Machine Learning Course Materials*. Available at: <http://cs229.stanford.edu/materials.html> (accessed 25 October 2017).
20. Quarteroni A., Saleri F., Gervasio P. *Scientific Computing with MATLAB and Octave*. Berlin, Springer Science & Business Media, 2014. 450 p.

УДК 681.3:612.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.8

ЭФФЕКТИВНЫЕ КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ПОИСКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАТТЕРНОВ В СОСТАВЕ ЗАШУМЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОГРАММ

И. В. Щербань^а, доктор техн. наук, доцент, shcheri@mail.ru

Н. Е. Кириленко^а, младший научный сотрудник, nikolai-kirilenko@mail.ru

О. Г. Щербань^а, канд. техн. наук, доцент, shchero@mail.ru

^аЮжный федеральный университет, Милякова ул., 10, Ростов-на-Дону, 349090, РФ

Постановка проблемы: рассматривается класс задач, когда требуется выявлять скрытые закономерности в перестройках биоэлектрической активности живых организмов, регистрируемых на фоне различных воздействий, посредством поиска и временной локализации в составе зашумленных электрограмм паттернов, несущих полезную информацию. Один из подходов к решению подобных задач основан на анализе энтропии Шеннона, вычисляемой по компонентам спектра мощности и называемой функцией спектральной энтропии. Оказалось, что в условиях, когда искомые паттерны относятся к высокочастотным ритмам, а границы их энергетических спектров априорно неизвестны, критериальные функции спектральной энтропии имеют низкую чувствительность. **Цель:** разработка критериальных функций энтропийного анализа, имеющих достаточную чувствительность для поиска в составе зашумленных электрограмм высокочастотных паттернов с априорно неизвестными характеристиками. **Результаты:** разработана критериальная функция, позволяющая находить тот частотный диапазон, который соответствует максимальному вкладу спектральных составляющих искомого паттерна в общую мощность спектра. Последующий расчет спектральной энтропии в найденном диапазоне частот обеспечивает решение задачи поиска в составе зашумленных электрограмм ответных паттернов в вышеуказанных условиях. **Практическая значимость:** представлены результаты, подтверждающие эффективность использования разработанных функций, ограничением на использование которых является требование регистрирования электрограммы на более чем одном отведении.

Ключевые слова — электрограмма, высокочастотный паттерн, функция Шеннона, спектральная энтропия, локальный диапазон частот.

Цитирование: Щербань И. В., Кириленко Н. Е., Щербань О. Г. Эффективные критериальные функции спектральной энтропии для поиска высокочастотных паттернов в составе зашумленных электрограмм // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 8–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.8

Citation: Shcherban' I. V., Kirilenko N. E., Shcherban' O. G. Effective Cost Functions for Spectrum Entropy to Search for High-Frequency Event-Related Patterns in Electrograms with Noise. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 8–17 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.8

Введение

В ходе экспериментальных исследований реакций живых организмов на внешние воздействия традиционно решаются задачи анализа ответных электрограмм (ЭГ), поиска и идентификации в их составе специфических паттернов, несущих полезную информацию [1–4]. В первую очередь речь идет об анализе биоэлектрической активности структур нервной системы. Достаточно распространенным инструментарием при этом является энтропийный анализ, развиваемый в работах [2, 3, 5–8] и многих других и позволяющий выявлять скрытые закономерности в перестройках биоэлектрической активности, регистрируемых на фоне различных воздействий.

В приложениях, где информативными являются частотные характеристики искомого паттерна, перевод сигналов из временного представления в частотно-временное выполняется за

счет оконного преобразования Фурье или посредством дискретного или непрерывного вейвлет-преобразования. Далее традиционно рассчитываются различные энтропийные критериальные функции — Шеннона, Колмогорова, Кульбака и т. п. В подходах, когда функция Шеннона вычисляется по компонентам спектра мощности и оценивается вклад в энтропию спектральных составляющих из заданного частотного диапазона, используется функция спектральной энтропии (СЭ) [9]. Метод анализа СЭ получил широкое применение в биомедицинских исследованиях, например, в задачах идентификации стадий анестезии по регистрируемому ЭГ [10, 11], оценки хаотичности сердечного ритма [12], диагностики эпилепсии [13–16] и других практических задачах [17–20].

Несмотря на значительный объем публикаций, отражающих широкое практическое использование метода СЭ, проблемы в некоторых частных случаях все же существуют. Так, до

сих пор неясным является способ выбора границ анализируемого частотного диапазона для расчета СЭ. Например, в тех случаях, когда эти границы априорно известны с достаточной точностью или когда информативными являются низкочастотные α -, β - или θ -ритмы суммарной активности областей неокортекса, проблем не возникает. Но в задачах поиска в составе ЭГ относительно высокочастотных паттернов ритмов γ_1 , γ_2 или γ_3 метод СЭ часто не позволяет найти однозначное решение. Объяснить это можно тем, что вклад низкочастотных составляющих в общую мощность спектра всего сигнала является значительным, что обуславливает достаточно высокую чувствительность критериальных функций СЭ для описания эффектов реактивности. Этот же факт, по всей видимости, служит причиной низкой чувствительности функций СЭ, если искомые паттерны относятся к высокочастотным составляющим, а границы их энергетических спектров априорно неизвестны. Кроме того, в составе ЭГ могут присутствовать негауссовы шумы значительной интенсивности, вызванные шумами не только электронных трактов измерительной и регистрирующей аппаратуры, но и шумами, связанными с принципиально неизвестными исследователю физическими, а в ряде случаев и физиологическими, процессами. Это не позволяет получить достаточную и подробную статистическую информацию о свойствах шумовых составляющих регистрируемых сигналов, а энергетические спектры шумов и искомым высокочастотным паттернов могут частично совпадать или быть достаточно близкими. Например, в ходе проведенных экспериментальных исследований наилучшие результаты применения метода СЭ наблюдались в задачах поиска в составе зашумленных ЭГ паттернов, имеющих относительно низкую амплитуду и узкополосные «априорно неизвестные» частотные спектры в границах 70–150 Гц.

Для преодоления названных проблем разработанная дополнительная энтропийная критериальная функция, позволяющая осуществлять поиск того частотного диапазона, который бы максимально соответствовал частотам спектральных составляющих искомым паттернов, обеспечивающих максимальный вклад в общую мощность спектра ЭГ. Таким образом повышается чувствительность критериальных функций СЭ в задачах поиска в составе ЭГ паттернов с априорно неизвестными спектрами и относящихся к высокочастотным ритмам $\gamma_1 \dots \gamma_3$. Ограничением разработанного подхода является тот факт, что ЭГ, в составе которой требуется осуществить временную локализацию паттернов, должна регистрироваться на более чем одном отведении. Представлены результаты практического использования разработанного подхода.

Особенности использования метода СЭ для поиска и временной локализации ответных паттернов в составе электрограмм

Вследствие дискретности процедуры измерений ЭГ $x(t)$ на интервале времени наблюдений $t \in [t_0; T]$ с постоянным шагом по времени $\Delta t = 1$ рассматривается конечный временной ряд $\{x_k\}_{k=1}^n$ объемом n чисел

$$t_k = t_0 + (k-1)\Delta t : x_k = x(t)|_{t=t_k}, k=1, 2, \dots, n, (1)$$

где k — номер выборки; t_0 — начальный момент времени наблюдений, в общем случае равный нулю. Полагаем, что в составе ЭГ (1) присутствует паттерн ответной биоэлектрической активности, длительность которого $\Delta T_p \in [0; T]$ существенно меньше времени наблюдения ЭГ T , т. е. $\Delta T_p \ll T$. Временное положение паттерна в составе ЭГ (1) неизвестно.

В рассматриваемом классе задач временной ряд (1) традиционно разбивается на $L > 1$ перекрывающихся или неперекрывающихся временных эпох, и осуществляется поиск той эпохи, в которой с максимальной вероятностью присутствует паттерн ответной биоэлектрической активности [2]. Для непересекающихся эпох объемом $\tilde{n} < n$ чисел значения каждого \tilde{k} -го отсчета l -й временной выборки $\{x_{l,\tilde{k}}\}_{\tilde{k}=1}^{\tilde{n}}$ из ряда $\{x_k\}_{k=1}^n$ определяются как

$$\tilde{k} = k - (l-1)\tilde{n},$$

где $l = 1, 2, \dots, L$ — номер эпохи; $l = \lceil k/\tilde{n} \rceil$; $\tilde{k} = 1, 2, \dots, \tilde{n}$; $\tilde{n} = \langle n/L \rangle$ (квадратные скобки подразумевают выполнение процедуры округления до большего целого значения, а треугольные — до меньшего), а для пересекающихся — уравнением

$$\tilde{k} = k - (l-1)\Delta\tilde{n},$$

где $\Delta\tilde{n}$ — число отсчетов для сдвига скользящего временного окна.

Посредством последовательного применения процедуры преобразования Фурье к каждой l -й выборке $\{x_{l,\tilde{k}}\}_{\tilde{k}=1}^{\tilde{n}}$ из ряда (1) находятся соответствующие функции плотности спектра мощности (СПМ) $P_l(f)$ и выполняется их нормализация [10]:

$$\sum_{f_i} \tilde{P}_l(f_i) = C_l \sum_{f_i} P_l(f_i) = 1; f_i \in [f^{\min}; f^{\max}], (2)$$

где $\tilde{P}_l(f_i)$ — нормализованная функция СПМ для каждой l -й эпохи; C_l — коэффициенты нормализации; f^{\min}, f^{\max} — границы исследуемого ло-

кального диапазона частот. Далее рассчитываются СЭ

$$H_l[f^{\min}; f^{\max}] = -\sum_{f_i} \tilde{P}_l(f_i) \log(\tilde{P}_l(f_i)), \quad (3)$$

связанные с тем или иным функционалом, поиск экстремума которого и отражает суть решения сформулированной выше задачи. Часто используют критерий [2]

$$\max_l \left\{ \Gamma_l = \frac{H_l - H}{H} \right\}, \quad (4)$$

где Γ_l — вариация СЭ H_l l -й эпохи относительно СЭ H , рассчитываемой аналогично (2), но для всего временного ряда (1). Чем больше значение критериальной функции Γ_l , тем больше отличается ЭГ, «с событием связанная», в этой эпохе, от всего временного ряда (1), тем вероятнее наличие здесь паттерна ответной биоэлектрической активности.

Очевидно, что в формулах (2)–(4) способ выбора граничных значений f^{\min} , f^{\max} исследуемого частотного диапазона остается неясным. Далее показаны характерные примеры, демонстрирующие существенную зависимость чувствительности функций СЭ (2)–(4) от точности выбора границ f^{\min} , f^{\max} .

Практические примеры, демонстрирующие низкую чувствительность функций СЭ в рассматриваемом классе задач

Рассматривались случаи, когда в составе ЭГ присутствуют аддитивные паттерны низкой интенсивности, энергетические спектры которых соответствуют ритмам γ_1 , γ_2 или γ_3 . Модельная ЭГ $x(t)$ в виде (1), таким образом, может быть представлена временным рядом

$$\{x_k\}_{k=1}^n = \{z_k + y_k\}_{k=1}^n, \quad (5)$$

где z_k — измеренная ЭГ; y_k — моделируемый аддитивный паттерн.

Аналізу подлежали модельные дискретные выборки $\{x_k\}_{k=1}^{2048}$ объемом $n = 2048$ отсчетов, которые делились на $L = 7$ эпох по $\tilde{n} = 512$ отсчетов с перекрытием $\Delta\tilde{n} = 256$ отсчетов. С целью повысить качество сравнительного анализа использовалось около 30 видов моделей паттернов, характерных для исследуемых биомедицинских приложений, отличавшихся формой, средней величиной значимых колебаний, шириной спектра, длительностью ΔT_p и местоположением в составе ЭГ. В ходе применения метода СЭ эти параметры представлялись как априорно неизвестные.

Далее приведены результаты численных исследований только для двух паттернов $y_k = y_k^{(1)}$ и $y_k = y_k^{(2)}$, задававшихся уравнениями

$$y_{k+1}^{(1)} = \begin{cases} k \in [500; 900]: -0,4 \sin\left(5\pi u_k^{(1)}\right) - \\ -0,4 \sin\left(6\pi u_k^{(1)}\right); \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

и

$$y_{k+1}^{(2)} = \begin{cases} k \in [500; 700]: -0,4 \sin\left(5\pi u_k^{(2)}\right) + \\ +0,6 \sin\left(15\pi u_k^{(2)}\right); \\ 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $y_0^{(1)} = y_0^{(2)} = 0$; $u_k^{(1)} = \sin(2\pi k/700)$; $u_k^{(2)} = \sin(2\pi k/1000)$.

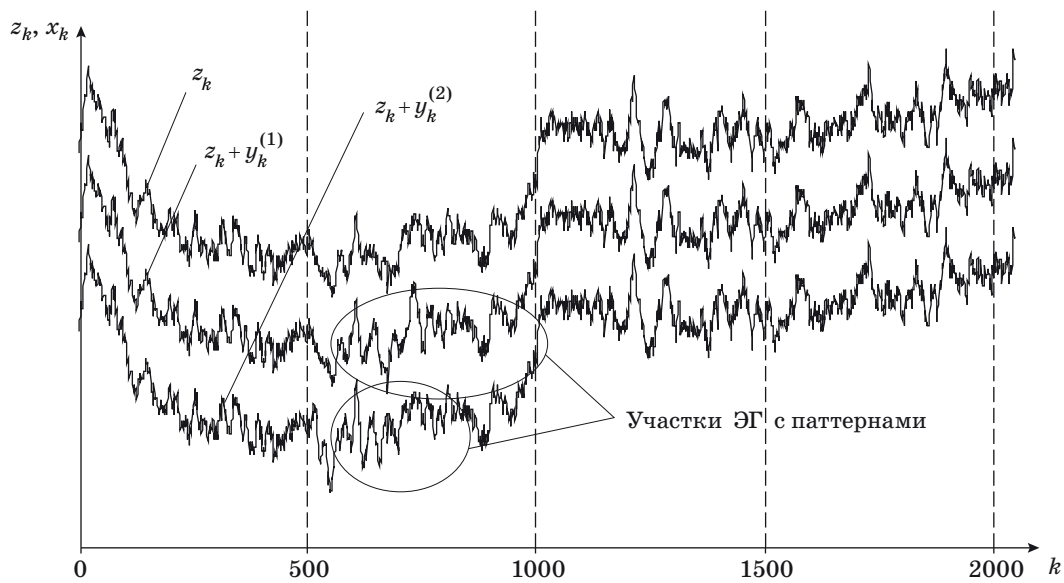
Графики ЭГ без паттерна z_k , паттернов $y_k^{(1)}$ (6) и $y_k^{(2)}$ (7) и их спектров, а также модельной ЭГ x_k (5) с аддитивными паттернами (6), (7) приведены на рис. 1, 2.

Энтропийный анализ, таким образом, должен был обеспечить наглядное отражение факта наличия паттерна $y_k^{(1)}$ или $y_k^{(2)}$ в составе модельной ЭГ (5) в $l = 3$ временной эпохе, охватывавшей временной интервал [512; 1024] отсчетов.

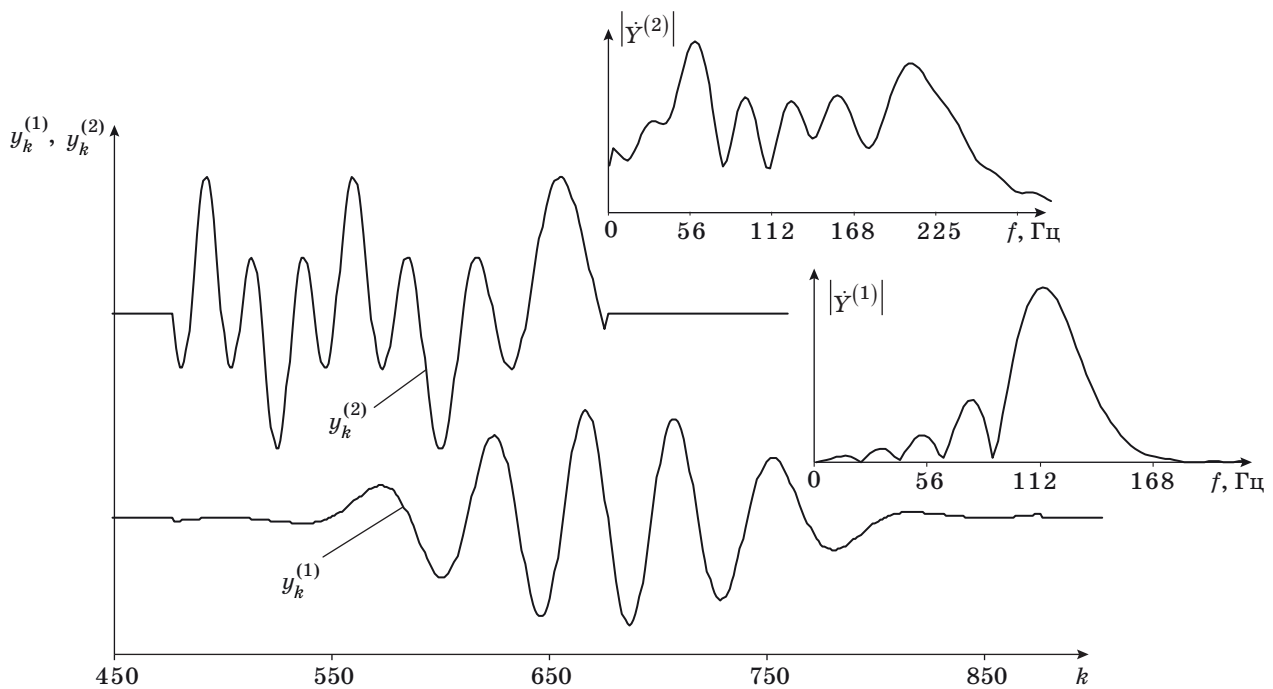
Исходя из того условия, что искомые паттерны относятся к частотной области одного из γ -ритмов, расширенные граничные значения задавались

$$f^{\min} = 50 \text{ Гц}, f^{\max} = 250 \text{ Гц}. \quad (8)$$

Графики критериальных функций Γ_l (4), рассчитанных для ЭГ без паттерна z_k и для модельных ЭГ (5) с аддитивными паттернами (6) или (7), представлены на рис. 3. Как видно, факты наличия искомых паттернов (6), (7) в составе модельных ЭГ (5) в $l = 3$ эпохе графики не отражают. Например, максимумы всех трех функций совпадают и наблюдаются на 2-й временной эпохе, что свидетельствует о наличии в рассматриваемом расширенном диапазоне частот (8) в составе ЭГ локальных особенностей, никак не связанных с искомыми паттернами. Представленные результаты подтверждают вывод о низкой чувствительности критериальных функций СЭ в задачах поиска в составе зашумленных ЭГ паттернов, относящихся к высокочастотным ритмам γ_1 , γ_2 или γ_3 , когда спектры этих паттернов априорно неизвестны и анализ проводится в расширенном диапазоне частот.



■ **Рис. 1.** ЭГ без паттерна z_k и модельные ЭГ x_k с аддитивными паттернами $y_k^{(1)}$ или $y_k^{(2)}$
 ■ **Fig. 1.** Electrogram without pattern z_k and model electrogram x_k with additive patterns $y_k^{(1)}$ or $y_k^{(2)}$



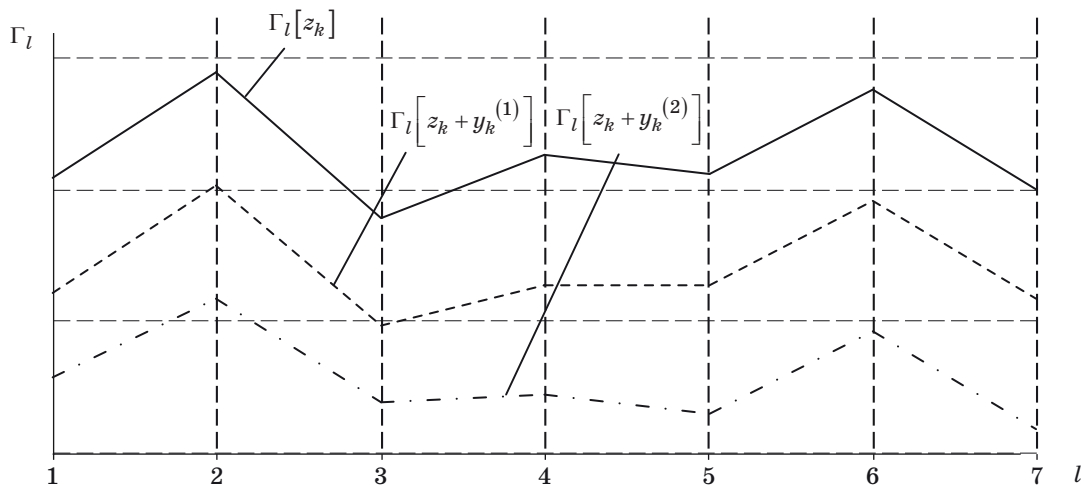
■ **Рис. 2.** Модельные паттерны $y_k^{(1)}$, $y_k^{(2)}$ и их спектры $|\dot{Y}^{(1)}|$, $|\dot{Y}^{(2)}|$
 ■ **Fig. 2.** Model patterns $y_k^{(1)}$, $y_k^{(2)}$ and spectrums $|\dot{Y}^{(1)}|$, $|\dot{Y}^{(2)}|$ of patterns

Новые критериальные функции СЭ

Предположим, что существует возможность одновременной регистрации в одноименные моменты времени $t \in [0; T]$ на N отведениях многомерной ЭГ $X(t) = (x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_N(t))^T$, где N — ко-

личество сенсоров. Тогда каждую J -ю компоненту ЭГ $x_J(t)$ ($J = 1, N$) запишем как

$$t_k = t_0 + (k-1)\Delta t : x_{J,k} = x_J(t) \Big|_{t=t_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$



■ **Рис. 3.** Критериальная функция Γ_l для ЭГ без паттерна z_k и для модельных ЭГ x_k с аддитивными паттернами $y_k^{(1)}$ или $y_k^{(2)}$
 ■ **Fig. 3.** Cost functions Γ_l for electrogram without pattern z_k and for model electrograms x_k with additive patterns $y_k^{(1)}$ or $y_k^{(2)}$

Положим, что повысить чувствительность критериальных функций СЭ возможно, если использовать в расчетах не расширенный диапазон частот $[f^{\min}, f^{\max}]$, а более узкий в сравнении с ним диапазон

$$[\hat{f}^{\min}; \hat{f}^{\max}] : (\hat{f}^{\max} - \hat{f}^{\min}) \ll (f^{\max} - f^{\min}). \quad (10)$$

Очевидно, что выбор оценок \hat{f}^{\max} , \hat{f}^{\min} при этом должен производиться из условия, что в узком частотном диапазоне (10) в общую мощность спектра максимальный вклад вносят именно спектральные составляющие искомого паттерна. Известно, что максимальные значения энтропии достигаются для сигнала, представляющего собой белый шум, так как в этом случае спектральные составляющие равномерно распределены по всему диапазону задействованных частот и относительные энергии практически равномерны на всех уровнях разрешения. Относительный же энергетический вклад искомого паттерна концентрируется вокруг некоторого диапазона частот. Спектральные составляющие распределяются при этом по частотам неравномерно, и некоторые из них, в зависимости от свойств паттерна, вносят максимальный вклад в общую мощность спектра ЭГ. Следовательно, в тех эпохах, где присутствует паттерн, должен наблюдаться всплеск некоторых спектральных составляющих СПМ. Поэтому энтропия распределения по временным эпохам любой отдельной спектральной составляющей из расширенного частотного диапазона будет тем выше, чем равномернее это распределе-

ние. Если же в составе какой-то временной эпохи наблюдается всплеск какой-либо спектральной составляющей, что может свидетельствовать о «вкладе» паттерна, то энтропия распределения по временным эпохам этой отдельной спектральной составляющей будет низкой.

Исходя из приведенных рассуждений сформулируем критериальную функцию

$$h_{f_i} = - \sum_l \tilde{P}_l(f_i) \log(\tilde{P}_l(f_i)), \quad (11)$$

где h_{f_i} — энтропия распределения по временным эпохам каждой отдельной спектральной составляющей частоты f_i из расширенного частотного диапазона $f_i \in [f^{\min}, f^{\max}]$.

Функция (11) будет иметь минимальное значение для тех i -х спектральных составляющих, которые максимально неравномерно распределены по временным эпохам, что будет свидетельствовать о наличии характерных локальных особенностей в составе ЭГ на частоте f_i .

Ясно, что в составе зашумленной ЭГ на любых частотах из расширенного частотного диапазона могут также присутствовать по тем или иным причинам различные спонтанные осцилляции — локальные особенности, никак не связанные с искомыми паттернами. Эти локальные осцилляторные структуры будут приводить к тем же эффектам, что и искомые паттерны, — минимизировать функцию (11). Например, судя по графикам критериальной функции (4) (см. рис. 3), в составе измеренной ЭГ z_k на временных интервалах 2-й и 6-й эпох присутствовали имен-

но такие особенности. Поэтому далее учтем тот факт, что ЭГ регистрируется одновременно на N отведениях. Ясно, что временные и частотные характеристики: форма, средняя величина значимых колебаний, ширина спектра, длительность и временное расположение — каждой спонтанной локальной особенности в составе каждой J -й ($J = \overline{1, N}$) компоненты ЭГ будут разными. Те же самые характеристики, но уже ответных паттернов, регистрируемых во всех N отведениях, будут, наоборот, совпадать с точностью до малых значений. Следовательно, усреднение по всем N отведениям одноименных значений каждой J -й функции вида (11) позволит найти тот узкий частотный диапазон (10), который соответствует максимальной вкладу в общую мощность спектра ЭГ спектральных составляющих искомого ответных паттернов.

Поэтому критерий для определения оценок \hat{f}^{\max} , \hat{f}^{\min} узкого частотного диапазона, соответствующего максимальному вкладу в общую мощность спектра именно спектральных составляющих искомого паттернов ответной биоэлектрической активности, зададим следующим образом:

$$\min_{f_i} \left\{ \tilde{h}_{f_i} = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N h_{J, f_i} \right\}, \quad (12)$$

где $h_{J, f_i} = -\sum_l \tilde{P}_{J, l}(f_i) \log(\tilde{P}_{J, l}(f_i))$ — энтропия распределения по временным эпохам спектральной составляющей частоты $f_i \in [f^{\min}, f^{\max}]$ для J -й компоненты ЭГ; $P_{J, l}(f_i)$, $\tilde{P}_{J, l}(f_i)$ — соответственно СПМ и нормализованная СПМ l -й выборки J -й компоненты ЭГ,

$$\sum_{f_i} \tilde{P}_{J, l}(f_i) = C_{J, l} \sum_{f_i} P_{J, l}(f_i) = 1, \quad l = 1, 2, \dots, L,$$

где $C_{J, l}$ — соответствующие коэффициенты нормализации.

Следует также отметить робастность функции \tilde{h}_{f_i} критерия (12) к неизбежным относительным вариациям времени наблюдения ответных паттернов и их форм на разных отведениях. Например, усреднение по N отведениям одноименных k -х значений многомерной ЭГ

$$\tilde{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N x_{J, k} \quad (13)$$

с последующим расчетом функции (11) для усредненной ЭГ \tilde{x}_k было бы неверным именно вследствие наличия относительных смещений ответных паттернов по отведениям. Подобные временные смещения могут приводить к эффекту, в радиосвязи называемому федингом (замиранием) ра-

диосигнала, обусловленному флуктуациями амплитуд, фаз и углов прибытия паттернов в каждом отведении. Соответственно, в некоторых случаях паттерны в разных отведениях могут наблюдаться, например, в противофазе, и, таким образом, усреднение по компонентам ЭГ вида (13), в отличие от (12), не приведет к ожидаемому эффекту от регистрации ЭГ на множестве отведений.

Далее формулы (3) и (4) перепишем следующим образом:

$$H_{J, l} [\hat{f}^{\min}; \hat{f}^{\max}] = -\sum_{f_i} \tilde{S}_{J, l}(f_i) \log(\tilde{S}_{J, l}(f_i)); \quad (14)$$

$$\max_l \left\{ \tilde{\Gamma}_l = \frac{\tilde{H}_l - \tilde{H}}{\tilde{H}} \right\}, \quad (15)$$

где $\tilde{H}_l = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N H_{J, l}$, $\tilde{H} = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N H_J$ — усредненные

по N отведениям соответствующие значения СЭ; $f_i \in [\hat{f}^{\min}; \hat{f}^{\max}]$.

Эффективность использования критериальных функций (12), (14), (15) исследовалась на тех же практических примерах.

Численные исследования предложенных критериальных функций

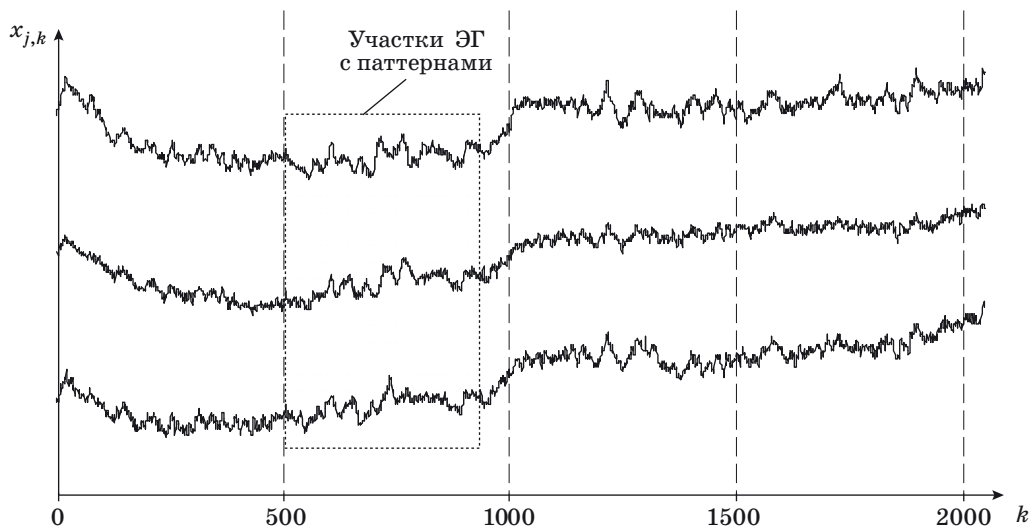
Измерения многомерной ЭГ $\{z_{J, k}\}_{k=1}^n$ выполняли на $N = 8$ отведениях ($J = 1, 2, \dots, 8$). Анализу подлежали аналогичные вышерассмотренным модельные дискретные выборки тем же объемом с делением на те же эпохи:

$$\{x_{J, k}\}_{k=1}^{2048} = \{z_{J, k} + y_{J, k}\}_{k=1}^{2048}; \quad L = 7; \\ \tilde{n} = 512; \quad \Delta \tilde{n} = 256. \quad (16)$$

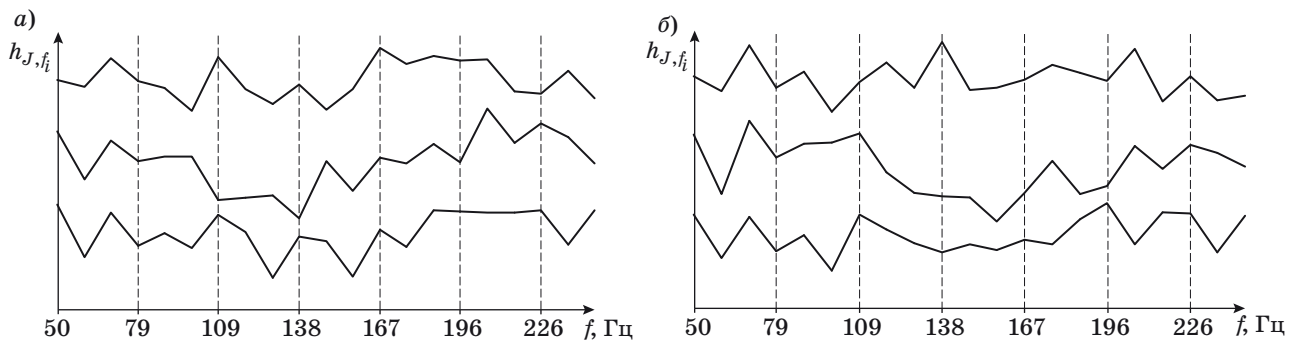
Использовались те же виды моделей паттернов, но дополнительно в каждом J -м отведении задавались случайные вариации их форм и временных параметров, характерные для исследуемых биомедицинских сигналов. Например, для паттернов вида (6) или (7) максимальное смещение моментов их инкапсуляции в состав измеренных ЭГ составляло ± 25 отсчетов, а вариации средней величины значимых колебаний составляли порядка 10 %.

Примеры графиков трех произвольных компонент многомерной модельной ЭГ (16) с аддитивным паттерном вида (6) приведены на рис. 4.

По приведенным графикам невозможно сделать однозначный вывод о выборе оценок \hat{f}^{\max} , \hat{f}^{\min} узкого частотного диапазона (10) ни для одного из паттернов. В то же время по графикам функции \tilde{h}_{f_i} (12) (рис. 5, а и б), рассчитанной по



■ **Рис. 4.** Компоненты многомерной ЭГ с аддитивными паттернами $y_{J,k}^{(1)}$ ($J = 1, 2, 3$)
 ■ **Fig. 4.** Components of multidimensional electrogram with additive patterns $y_{J,k}^{(1)}$ ($J = 1, 2, 3$)



■ **Рис. 5.** Функция h_{J,f_i} ($J = 1, 2, 3$) для ЭГ с аддитивными паттернами $y_k^{(1)}$ (а) и $y_k^{(2)}$ (б)
 ■ **Fig. 5.** Function h_{J,f_i} ($J = 1, 2, 3$) for electrograms with additive patterns $y_k^{(1)}$ (a) and $y_k^{(2)}$ (б)

всем восьми отведениям, эти оценки определить возможно. С целью сравнительного анализа на рис. 6, а и б показаны и графики функции \tilde{h}_{f_i} , рассчитанные для измеренной многомерной ЭГ $\{z_{J,k}\}_{k=1}^{2048}$ ($J = \overline{1,8}$), не включавшей модельные паттерны.

По представленным графикам для последующих расчетов функций (14), (15) были выбраны следующие значения оценок:

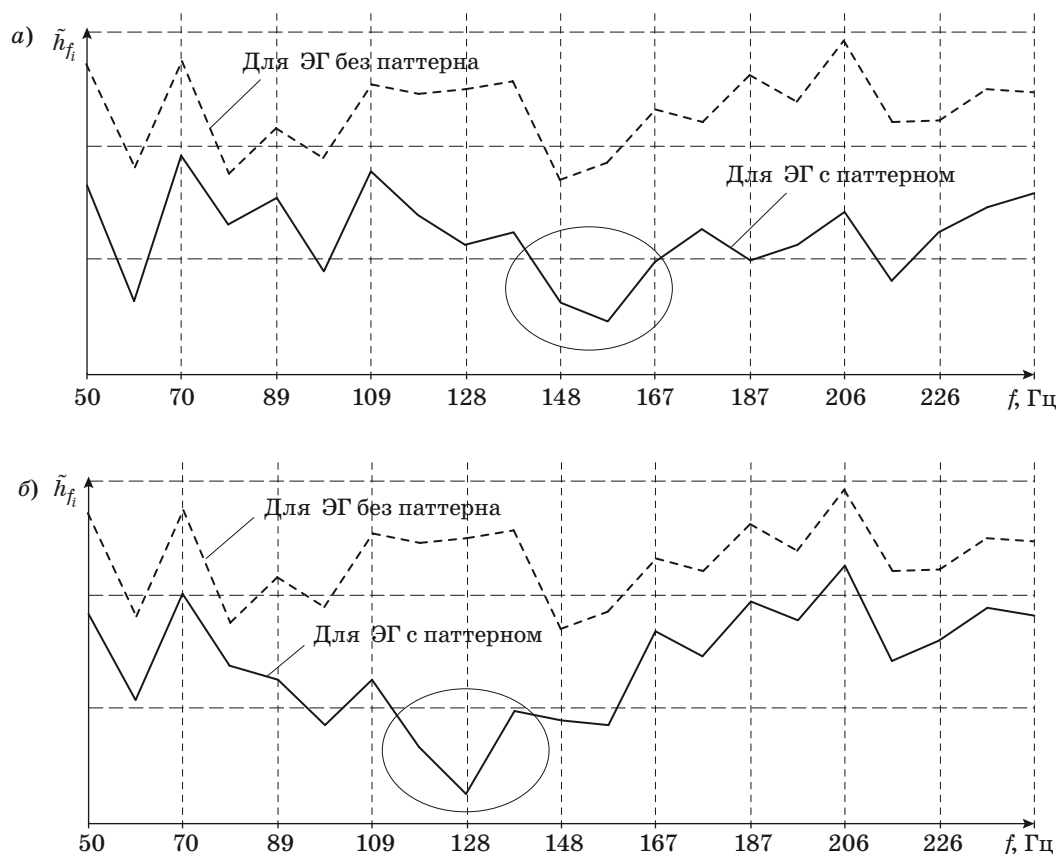
$$\hat{f}^{\min} = 145, \hat{f}^{\max} = 165 \text{ Гц} \quad (17)$$

для паттерна $y_k^{(1)}$ и

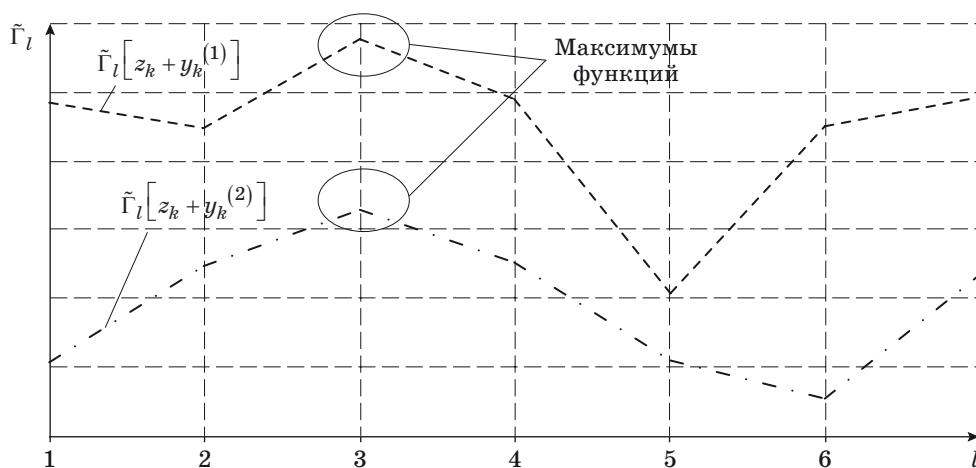
$$\hat{f}^{\min} = 110, \hat{f}^{\max} = 135 \text{ Гц} \quad (18)$$

для паттерна $y_k^{(2)}$. Сравнение оценок (17), (18) со спектрами модельных паттернов, показанными на рис. 2, подтверждает корректность проведенных рассуждений.

Графики критериальной функции $\tilde{\Gamma}_l$ (15), рассчитанной для модельных многомерных ЭГ с аддитивными паттернами (6) или (7), приведены на рис. 7. Они наглядно отражают факты наличия специфических паттернов в составе модельных ЭГ и позволяют правильно осуществить их временную локализацию. Например, паттерн $y_k^{(1)}$, с учетом моделировавшихся случайных вариаций моментов инкапсуляции его в состав каждой компоненты измеренной многомерной ЭГ $\{z_{J,k}\}_{k=1}^{2048}$, мог находиться в пределах $[500; 900] \pm 25$ отсчетов. То есть большей частью пат-



■ **Рис. 6.** Функция \tilde{h}_f для ЭГ, не включавшей модельные паттерны, и для ЭГ с аддитивными паттернами $y_k^{(1)}$ (а) и $y_k^{(2)}$ (б)
 ■ **Fig. 6.** Function \tilde{h}_f for electrogram without additive pattern and electrograms with additive patterns $y_k^{(1)}$ (a) and $y_k^{(2)}$ (b)



■ **Рис. 7.** Критериальная функция $\tilde{\Gamma}_l$ для модельных ЭГ с аддитивными паттернами $y_k^{(1)}$ или $y_k^{(2)}$
 ■ **Fig. 7.** Cost functions $\tilde{\Gamma}_l$ for model electrograms with additive patterns $y_k^{(1)}$ or $y_k^{(2)}$

терны по отведениям находились в 3-й временной эпохе, охватывавшей интервал [512; 1024] отсчетов, и частично во 2-й и 4-й эпохах на интервалах

[256; 768] и [768; 1280] отсчетов соответственно, что и отражают графики критериальной функции $\tilde{\Gamma}_l$ на рис. 7.

Заключение

Результаты численных исследований подтвердили вывод о возможности повышения чувствительности критериальных функций СЭ за счет выбора для анализа диапазона частот, соответствующего максимальному вкладу в общую мощность спектра составляющих искомым паттернов ответной биоэлектрической активности.

Разработанные критериальные функции имеют достаточную чувствительность для поиска в составе зашумленных ЭГ паттернов ритмов $\gamma_1 \dots \gamma_3$ низкой интенсивности с априорно неизвестными частотными границами. Ограничением разработанного подхода является тот факт, что ЭГ, в составе которой требуется осуществить временную локализацию паттернов, должна регистрироваться на более чем одном отведении.

Литература

1. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach. — Wiley-IEEE Press, 2007. — 440 p.
2. Giannakakis G. A., Tsiaparas N. N., Xenikou M. S., Papageorgiou Ch., Nikita K. S. Wavelet Entropy Differentiations of Event Related Potentials in Dyslexia // 8th IEEE Intern. Conf. on Bioinformatics and Bioengineering, Athens, Greece, 2008. P. 1–6.
3. Немирко А. П., Манило Л. А., Калиниченко А. Н., Волкова С. С. Энтропийные методы оценки уровня анестезии по ЭЭГ-сигналу // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3. С. 69–74.
4. Горшков А. А., Осадчий А. Е., Фрадков А. Л. Регуляризация обратной задачи ЭЭГ/МЭГ локальным кортикальным волновым паттерном // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 12–20. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.12
5. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 202 с.
6. Agnew C. E., Hamilton P. K., McCann A. J., McGivern R. C., McVeigh G. E. Wavelet Entropy of Doppler Ultrasound Blood Velocity Flow Waveforms Distinguishes Nitric Oxide-Modulated States // Ultrasound in Medicine and Biology. 2015. Vol. 41. P. 1320–1327. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2014.12.013
7. Zunino L., Perez D. G., Garavaglia M., Rosso O. A. Wavelet Entropy of Stochastic Processes // Physica A. 2007. N 2(379). P. 503–512. doi:10.1016/j.physa.2006.12.057
8. Hong H., Yonghong T., Yuexia W. Optimal Base Wavelet Selection for ECG Noise Reduction Using a Comprehensive Entropy Criterion // Entropy. 2015. Vol. 17. P. 6093–6109. doi:10.3390/e17096093
9. Inoue T., Shinosaki K., Sakamoto H., Inouye T., Shinosaki K., Sakamoto H., Toi S., Ukai S., Iyama A., Katsuda Y., Hirano M. Quantification of EEG Irregularity by Use of the Entropy of the Power Spectrum // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1991. N 3(79). P. 204–210.
10. Viertio-Oja H., Maja V., Sarkela M., Talja P., Tenkanen N., Tolvanen-Laakso H., Paloheimo M., Vakkuri A., Yli-Hankala A., Merilainen P. Description of the Entropy Algorithm as Applied in the Datex-Ohmeda Entropy Module // Acta Anaesthesiologica Scandinavica. 2004. N 48. P. 154–161.
11. Kekovic G., Stojadinovic G., Martac L., Podgorac J., Sekulic S., Culic M. Spectral and Fractal Measures of Cerebellar and Cerebral Activity in Various Types of Anesthesia // Acta Neurobiologiae Experimentals. 2010. N 70. P. 67–75.
12. Останин С. А., Филатова Е. В. Виртуальный прибор для оценки спектральной энтропии сердечного ритма // Изв. Алтайского государственного университета. 2016. № 1. С. 45–51.
13. Mirzaei A., Ayatollahi A., Gifani P., Salehi L. Spectral Entropy for Epileptic Seizures Detection // Second Intern. Conf. on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, Liverpool, UK, 2010. P. 301–307. doi:10.1109/CICSyN.2010.84
14. Polat K., Gunes S. Classification of Epileptiform EEG Using a Hybrid System based on Decision Tree Classifier and Fast Fourier Transform // Applied Mathematics and Computation. 2007. N 187 (2). P. 1017–1026.
15. Kannathal N., Choo M. L., Acharya U. R. Entropies for Detection of Epilepsy in EEG // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2005. N 80. P. 187–194.
16. Zhang A., Yang B., Huang L. Feature Extraction of EEG Signals Using Power Spectral Entropy // Intern. Conf. on BioMedical Engineering and Informatics, IEEE, Sanya, Hainan, China, 2008. P. 435–439. doi:10.1109/BMEI.2008.254
17. Toh A. M., Togneri R., Nordholm S. Spectral Entropy as Speech Features for Speech Recognition // Processing of Electrical Engineering and Computer Science (PEECS 2005), Perth, Australia, 2005. P. 22–25.
18. Jia C., Xu B. An Improved Entropy-based Endpoint Detection Algorithm // Intern. Symp. on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP), Taipei, Taiwan, 2002. P. 96.
19. Zhang Y., Ding Y. A. Voice Activity Detection Algorithm based on Spectral Entropy Analysis of Sub-Frequency Band // BioTechnology: An Indian Journal. 2014. N 10(20). P. 12342–12348.
20. Misra H., Iqbal S., Bourlard H., Hermansky H. Spectral Entropy based Feature for Robust ASR // Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), IEEE, Montreal, Canada, 2004. P. 2–6.

UDC 681.3:612.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.8

Effective Cost Functions for Spectrum Entropy to Search for High-Frequency Event-Related Patterns in Electrograms with NoiseShcherban' I. V.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, shcheri@mail.ruKirilenko N. E.^a, Junior Researcher, nikolai-kirilenko@mail.ruShcherban' O. G.^a, PhD, Tech., Associate Professor, shchero@mail.ru^aSouthern Federal University, 10, Milchakova St., 349090, Rostov-on-Don, Russian Federation

Introduction: We discuss a wide range of problems about revealing hidden regularities in rearrangement of bio-electric activity of living organisms when it is registered on the background of various impacts, using look-up and temporal localization of event-related patterns in electrograms with noise. One of the approaches to solve such problems is based on Shannon entropy analysis calculated by the components of the power spectrum and called a function of spectrum entropy. When the sought patterns relate to high-frequency rhythms and their energy spectrum limits are a priori unknown, the cost functions of the spectrum entropy have low sensitivity. **Purpose:** Developing cost functions for entropy analysis which would have a sensitivity high enough to search for high-frequency patterns with a priori unknown parameters in electrograms with noise. **Results:** A cost function has been found which allows you to detect a frequency band corresponding to the maximum contribution of the spectral components of the sought patterns towards the total power of the spectrum. The subsequent calculation of the spectral entropy in the found frequency band provides a solution for the problem of finding event-related patterns under the conditions mentioned above. **Practical relevance:** The presented results confirm the effectiveness of using the developed functions. The only restriction is that an electrogram must be recorded on several electrodes.

Keywords — Electrogram, High-Frequency Pattern, Shannon Function, Spectral Entropy, Local Frequency Band.

Citation: Shcherban' I. V., Kirilenko N. E., Shcherban' O. G. Effective Cost Functions for Spectrum Entropy to Search for High-Frequency Event-Related Patterns in Electrograms with Noise. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 8–17 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.8

References

- Rangayyan R. M. *Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach*. Wiley-IEEE Press, 2007. 440 p.
- Giannakakis G. A., Tsiaparas N. N., Xenikou M. S., Papa-georgiou Ch., Nikita K. S. Wavelet Entropy Differentiations of Event Related Potentials in Dyslexia. *8th Intern. Conf. on Bioinformatics and Bioengineering*, IEEE, Athens, Greece, 2008, pp. 1–6.
- Nemirko A. P., Manilo L. A., Kalinichenko A. N., Volkova S. S. Entropy Methods of Anesthesia Depth Estimation Based on EEG Analysis. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 3, pp. 69–74 (In Russian).
- Gorshkov A. A., Osadchi A. E., Fradkov A. L. Regularization of EEG/MEG Inverse Problem with a Local Cortical Wave Pattern. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 5, pp. 12–20 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.12
- Cvetkov O. V. *Entropiinyi analiz dannykh v fizike, biologii i tekhnike* [Entropy Data Analysis in Physics, Biology and Technique]. Saint-Petersburg, SPbGETU "LETI" Publ., 2015. 202 p.
- Agnew C. E., Hamilton P. K., McCann A. J., McGivern R. C., McVeigh G. E. Wavelet Entropy of Doppler Ultrasound Blood Velocity Flow Waveforms Distinguishes Nitric Oxide-Modulated States. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 2015, vol. 41, pp. 1320–1327. doi:10.1016/j.ultrasmed-bio.2014.12.013
- Zunino L., Perez D. G., Garavaglia M., Rosso O. A. Wavelet Entropy of Stochastic Processes. *Physica A*, 2007, vol. 379, no. 2, pp. 503–512. doi:10.1016/j.physa.2006.12.057
- Hong H., Yonghong T., Yuexia W. Optimal Base Wavelet Selection for ECG Noise Reduction Using a Comprehensive Entropy Criterion. *Entropy*, 2015, vol. 17, pp. 6093–6109. doi:10.3390/e17096093
- Inoue T., Shinosaki K., Sakamoto H., Inouye T., Shinosaki K., Sakamoto H., Toi S., Ukai S., Iyama A., Katsuda Y., Hirano M. Quantification of EEG Irregularity by Use of the Entropy of the Power Spectrum. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1991, vol. 79, no. 3, pp. 204–210.
- Viertio-Oja H., Maja V., Sarkela M., Talja P., Tenkanen N., Tolvanen-Laakso H., Paloheimo M., Vakkuri A., Yli-Hankala A., Merilainen P. Description of the Entropy Algorithm as Applied in the Datex-Ohmeda Entropy Module. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 2004, no. 48, pp. 154–161.
- Kekovic G., Stojadinovic G., Martac L., Podgorac J., Sekulic S. and Culic M. Spectral and Fractal Measures of Cerebellar and Cerebral Activity in Various Types of Anesthesia. *Acta Neurobiologiae Experimentals*, 2010, no. 70, pp. 67–75.
- Ostanin S. A., Filatova E. V. A Virtual Instrument for Spectral Entropy Estimation of Heart Rate. *Izvestiia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 45–51 (In Russian). doi:10.14258/izvasu(2016)1-07
- Mirzaei A., Ayatollahi A., Gifani P., Salehi L. Spectral Entropy for Epileptic Seizures Detection. *Second Intern. Conf. on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, Liverpool, UK, 2010, pp. 301–307. doi:10.1109/CICSyN.2010.84
- Polat K., Gunes S. Classification of Epileptiform EEG Using a Hybrid System based on Decision Tree Classifier and Fast Fourier Transform. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, no. 187(2), pp. 1017–1026.
- Kannathal N., Choo M. L., Acharya U. R. Entropies for Detection of Epilepsy in EEG. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2005, no. 80, pp. 187–194.
- Zhang A., Yang B., Huang L. Feature Extraction of EEG Signals Using Power Spectral Entropy. *Intern. Conf. on Bio-Medical Engineering and Informatics*, IEEE, Sanya, Hainan, China, 2008, pp. 435–439. doi:10.1109/BMEI.2008.254
- Toh A. M., Togneri R., Nordholm S. Spectral Entropy as Speech Features for Speech Recognition. *Processing of Electrical Engineering and Computer Science (PEECS 2005)*, Perth, Australia, 2005, pp. 22–25.
- Jia C., Xu B. An Improved Entropy-based Endpoint Detection Algorithm. *Intern. Symp. on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP)*, Taipei, Taiwan, 2002, p. 96.
- Zhang Y., Ding Y. Voice Activity Detection Algorithm based on Spectral Entropy Analysis of Sub-Frequency Band. *Bio-Technology: An Indian Journal*, 2014, no. 10(20), pp. 12342–12348.
- Misra H., Ikbal S., Bourlard H., Hermansky H. Spectral Entropy based Feature for Robust ASR. *Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, Montreal, Canada, 2004, pp. 2–6.

УДК 681.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.18

СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМАТА С ПАМЯТЬЮ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К МЯГКИМ ОТКАЗАМ И РЕГИСТРАЦИЕЙ МЯГКИХ ОТКАЗОВ

И. В. Егоров^а, аспирант, iegorov@kspt.icc.spbstu.ru

В. Ф. Мелехин^а, доктор техн. наук, профессор, melekhin@kspt.ftk.spbstu.ru

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, РФ

Постановка проблемы: снижение проектной нормы в производстве полупроводниковых структур повышает чувствительность вычислительных устройств к попаданию частиц высоких энергий (в частности, при работе в условиях радиации), что приводит к возникновению мягких отказов — искажению информации при сохранении работоспособности аппаратуры. Проведенные ранее исследования показали, что наибольшее влияние на мягкие отказы оказывают элементы памяти, а комбинационные схемы влияют меньше. Поэтому известные способы повышения надежности, основанные на использовании структурной избыточности, в условиях мягких отказов малоэффективны. **Цель:** разработка новых технических решений для автомата с памятью, работающего при потоке мягких отказов. **Результаты:** разработана структура автомата Мура с троированием памяти, мажорированием выходных сигналов памяти и восстановлением информации на каждом такте, обладающая повышенной защитой от ложных импульсов, возникающих в области комбинационных схем и памяти состояний автомата. Разработанная структура также оснащена средствами регистрации количества мягких отказов, произошедших в ходе эксплуатации. Предложена методика расчета характеристик надежности и структурной сложности для разработанной структуры.

Ключевые слова — автомат с памятью, комбинационная схема, анализ надежности, оценка сложности аппаратной реализации, синхронизация, мягкие отказы, структурное резервирование, восстанавливаемые системы, вероятность безотказной работы.

Цитирование: Егоров И. В., Мелехин В. Ф. Способ организации автомата с памятью с повышенной устойчивостью к мягким отказам и регистрацией мягких отказов// Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 18–27. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.18

Citation: Egorov I. V., Melekhin V. F. Organizing a Finite State Machine with Higher Resistance to Soft Failures and Soft Failure Registration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 18–27 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.18

Введение

Под мягким отказом будем понимать явление, при котором в элементе памяти конечного автомата происходит искажение бита данных. Возникновение мягких отказов наиболее характерно при работе устройства в условиях повышенной радиации. Элемент памяти при этом остается работоспособным, что позволяет периодически восстанавливать его состояние путем перезаписи искаженных данных корректными [1].

В опубликованных работах [2–6] анализируются процессы в логических элементах и триггерах, выполненных по технологии КМОП (CMOS Fabrication), протекающие при воздействии радиации. Благодаря известным исследованиям [3, 7–9] установлена функциональная взаимосвязь между вероятностью попадания частицы высокой энергии и возникновением мягкого отказа в цифровом устройстве, а также определены подходы к оценке надежности [2, 10–11] технических систем, учитывающие влияние мягких отказов. На основании этих исследований авторами были

получены оценки вероятности возникновения мягкого отказа для различных известных реализаций автомата Мура со структурной избыточностью и восстановлением [5]. Результатом полученных оценок является сравнение различных структур конечного автомата с точки зрения надежности и сложности реализации (количества логических элементов).

В то же время актуальным остается вопрос повышения устойчивости конечного автомата к мягким отказам [12, 13], так как именно это свойство зачастую определяет надежность устройства при воздействии радиации [1].

В текущей работе предлагается схемотехническая реализация автомата Мура, обладающая лучшими (сравнительно с известными структурами [5, 14]) характеристиками надежности при воздействии потока мягких отказов [15]. Данное решение может быть использовано при проектировании отказоустойчивых восстанавливаемых вычислительных систем, работающих в условиях регулярного возникновения мягких отказов [16, 17].

Модель и структура автомата Мура

Модель автомата Мура S представляется следующей математической структурой:

$$S = \langle A, B, R, \delta, \lambda, r_0 \rangle,$$

где A — множество состояний входа (входной алфавит); B — множество состояний выхода (выходной алфавит); R — множество внутренних состояний; $r_0 \in R$ — начальное состояние, в которое автомат приводится сигналом начальной установки; $\delta: A \times R \rightarrow R$ — функция переходов; $\lambda: R \rightarrow B$ — функция выходов.

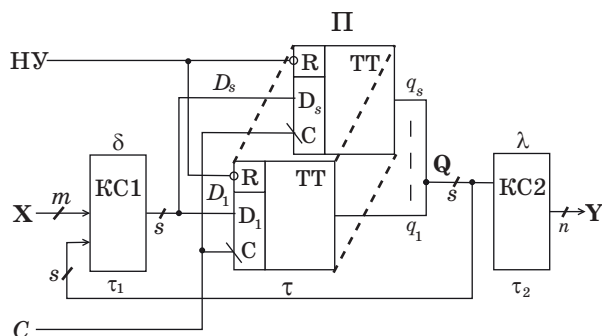
Традиционная структурная схема автомата Мура [4] представлена на рис. 1.

Комбинационная схема $KC1$ реализует функцию переходов δ ; $KC2$ реализует функцию выходов λ ; для реализации блока памяти Π автомата использованы триггеры TT типа D , синхронизируемые спадом тактового импульса синхронизации C ; $HУ$ — сигнал начальной установки; связи между блоками соответствуют функциям в автомате Мура: $\delta: \{X\} \times \{Q\} \rightarrow \{Q\}$; $\lambda: \{Q\} \rightarrow \{Y\}$; τ_1, τ_2, τ обозначают задержки в электронных схемах, реализующих блоки $KC1, KC2$ и Π соответственно.

Для данной структуры была получена [5] формула, позволяющая оценить вероятность отказа $P_{o,a1}$ и вероятность безотказной работы $\bar{P}_{o,a1}$ автомата в течение всего времени выполнения задачи T_3 при известной частоте $q_{п.ч.т}$ попадания заряженных частиц в один из транзисторов конечного автомата: $\bar{P}_{o,a1} = e^{-(q_{м.о.п} + q_{м.о.кc1})T_3}$, где:

— частота $q_{м.о.п}$ возникновения мягкого отказа автомата по причине попадания заряженной частицы в область Π напрямую зависит от числа транзисторов $N_{т.п}$, входящих в состав блока памяти ($q_{м.о.п} = N_{т.п} q_{п.ч.т}$);

— частота $q_{м.о.кc1}$ возникновения мягкого отказа автомата по причине попадания заряженной частицы в область $KC1$ рассчитывается по известной методике с учетом внутренней структуры $KC1$ (удаленности элементов от входов Π).



■ **Рис. 1.** Структурная схема автомата Мура
 ■ **Fig. 1.** The block diagram of the Moore automaton

Также при расчете $q_{м.о.кc1}$ учитывается тот факт, что ложный импульс, распространяющийся с выходов $KC1$, повлечет за собой изменение состояния Π (мягкий отказ) только в том случае, если он совпадет по времени с моментом записи данных (спадом синхроимпульса C) в один из триггеров Π . Этот интервал времени занимает незначительную долю периода синхронизации автомата. Таким образом, с точки зрения надежности $KC1$ имеет меньшую структурную значимость, нежели Π , где ложное изменение состояния любого из триггеров непосредственно приводит к мягкому отказу. Однако $KC1$ может содержать большее по сравнению с Π число логических элементов, что увеличивает вероятность попадания заряженных частиц в ее область и приводит к необходимости разработки механизма борьбы с ложными импульсами на выходах $KC1$.

Попадание частицы в область $KC2$ влияния на работу автомата не оказывает, так как эта комбинационная схема не подключена к элементам памяти, следовательно, ложный импульс, угасающий через несколько наносекунд после попадания частицы, не может привести к мягкому отказу.

Структура автомата Мура с троированием, мажорированием и самовосстановлением

Применительно к рассматриваемой задаче построения автомата с повышенной устойчивостью к мягким отказам определим расширение функций автомата дополнительно к основной функции реализации заданного алгоритма:

- 1) блокирование прохождения мягкого отказа на выход автомата;
- 2) восстановление состояния отказавшего экземпляра автомата без прерывания выполнения основной функции;
- 3) выявление, регистрация и подсчет числа мягких отказов в автомате.

Определим подходы к реализации этих функций.

Для блокирования прохождения искаженной информации на выход автомата будем использовать известный способ структурного резервирования — троирование и мажорирование, предложенный для систем с невозстанавливаемыми отказами. С учетом результатов проведенных исследований [5] троирование и мажорирование целесообразно использовать только для блока памяти автомата Π .

Мажорирование сигналов на выходах трех экземпляров блока памяти автомата обеспечит восстановление искаженной в случае мягкого отказа информации при очередном переходе автомата.

Для обнаружения мягких отказов в автомате предусмотрим в мажоритаре выходных сигналов

памяти Π формирование сигнала «ошибка» E (error).

Для регистрации и подсчета числа мягких отказов введем в структуру автомата блок регистрации ошибок (БРО).

Схема автомата Мура с троированием, мажорированием и самовосстановлением, предложенная авторами [15], приведена на рис. 2. Рассмотрим состав схемы и ее отличительные особенности в сравнении с традиционной схемой (см. рис. 1) автомата Мура без структурного резервирования.

Входные сигналы, аналогичные рис. 1:

— X — m -разрядный вектор входных информационных сигналов;

— C — тактовый импульс синхронизации;

— R — сигнал сброса (начальной установки).

Дополнительные входные сигналы:

— ENA (enable) — сигнал разрешения работы автомата: при $ENA = 1$ работа разрешена; при $ENA = 0$ автомат остановлен, при переходе сигнала $ENA 0 \rightarrow 1$ автомат продолжит работу с того

состояния, в котором был остановлен. Этот сигнал расширяет возможности использования автомата в системе;

— $R_{БРО}$ — сигнал сброса блока регистрации ошибок БРО. В восстанавливаемых системах периодически проводится мониторинг состояния блоков (проверка количества отказов, зарегистрированных БРО), в конце каждого цикла мониторинга производится сброс состояния БРО на начальное.

Выходные сигналы автомата:

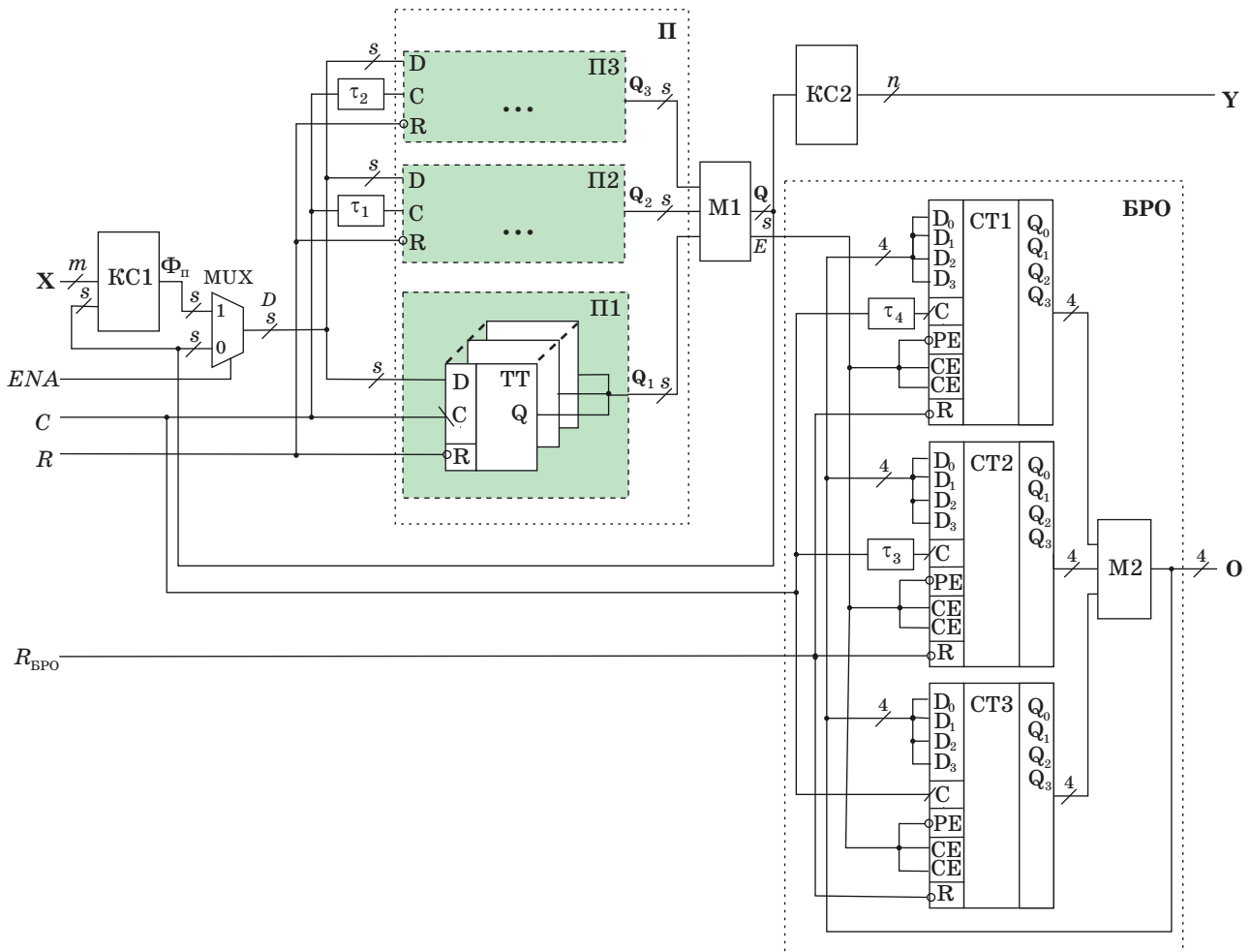
— Y — n -разрядный вектор информационных выходных сигналов (аналогично сигналам на рис. 1);

— O — код числа мягких отказов в автомате за период мониторинга.

Состав и назначение блоков структуры:

— $KC1$ — комбинационная схема, реализующая функцию переходов δ (аналогичная на рис. 1);

— $KC2$ — комбинационная схема, реализующая функцию выходов λ (аналогичная на рис. 1);



■ Рис. 2. Схема автомата Мура с троированием, мажорированием и самовосстановлением

■ Fig. 2. The block diagram of the Moore automaton with triple redundancy, majority voting and self-recovery

— *П* — блок памяти автомата, содержащий три экземпляра *П1*, *П2*, *П3* (каждый аналогичен блоку памяти *П* на рис. 1);

— *М1* — блок мажорирования троек соответствующих выходных сигналов блоков *П1*, *П2*, *П3*, дополнительно выявляющий возникновение отказа и формирующий в этом случае выходной сигнал *E*;

— *MUX* — мультиплексор, переключаящий на информационные входы блоков памяти *D* сигнал Φ_n перехода с выходов комбинационной схемы *КС1* либо сигнал *Q* с выходов блока *М1*;

— *БРО* — блок регистрации ошибок (мягких отказов в автомате);

— *СТ1*, *СТ2*, *СТ3* — три экземпляра синхронных счетчиков для подсчета числа мягких отказов;

— *М2* — блок мажорирования сигналов с выходов счетчиков и формирования сигнала *О* — числа мягких отказов за период мониторинга;

— $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ — элементы задержки.

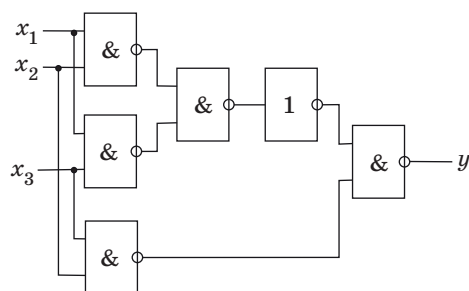
Поясним функции новых (по сравнению с рис. 1) блоков.

Блок мажорирования *М1* содержит *s* (*s* — число триггеров в памяти автомата) мажоритарных элементов. Возможная схема, реализующая мажоритарный элемент, представлена на рис. 3.

Помимо этого блок *М1* содержит схему, реализующую функцию выявления мягкого отказа:

$$E = (Q_1^1 + Q_1^2 + Q_1^3)(\bar{Q}_1^1 + \bar{Q}_1^2 + \bar{Q}_1^3) + \dots + (Q_s^1 + Q_s^2 + Q_s^3)(\bar{Q}_s^1 + \bar{Q}_s^2 + \bar{Q}_s^3).$$

Сигнал *E* поступает на вход БРО. В БРО для подсчета числа мягких отказов (ошибок) используется синхронный счетчик, например, соответствующий стандартному счетчику К153ЗИЕ10. Счетчик имеет информационные входы записи ($D_0D_1D_2D_3$), вход *PE* разрешения записи (при $PE = 0$), входы *CE* разрешения прибавления единицы (при $CE = 1$), вход синхронизации *C* и вход сброса *R*. Поскольку в самом счетчике под воздействием радиации могут возникать мягкие от-



■ **Рис. 3.** Структурная схема мажоритарного элемента
 ■ **Fig. 3.** The block diagram of the majority voter

казы, то в БРО применяется троирование счетчика и мажорирование. Блок мажорирования *М2* содержит четыре мажоритарных элемента соответственно числу разрядов в счетчике. Выходы блока мажорирования подключены к внешнему выходу *О* автомата и к информационным входам ($D_0D_1D_2D_3$) всех трех счетчиков. Управляющие входы *PE* и *CE* всех трех счетчиков соединены и подключены к выходу *E* блока мажорирования *М1*. Таким образом, при $E = 1$ в счетчиках по спаду *C* прибавляется 1, при $E = 0$ по спаду *C* записывается код с выхода *М2*, и каждый такт в счетчиках БРО происходит самовосстановление информации.

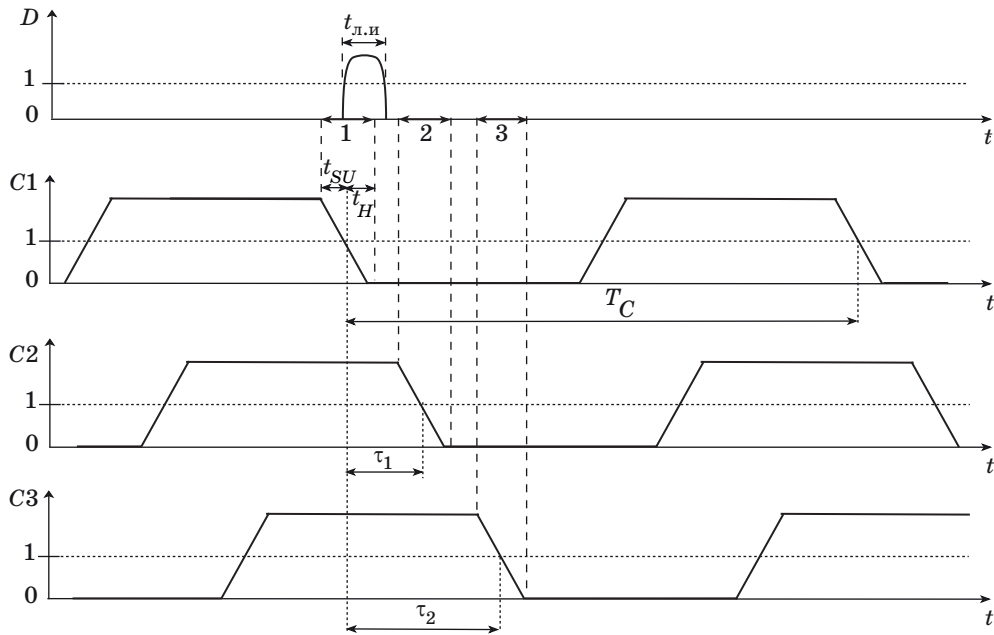
При работе автомата в режиме реализации алгоритма каждый такт выполняется переход в новое состояние (в некоторых случаях переход выполняется в старое состояние путем его подтверждения). В случае возникновения отказа в одном из экземпляров памяти он не проявляется на выходе *Q* мажоритарного элемента, и на информационные входы элементов *П* каждый такт поступает верная информация. Таким образом, каждый такт осуществляется самовосстановление данных в *П*.

В некоторых случаях в системах организуется работа автомата в стартстопном режиме. Для этого используется сигнал *ENA*, вырабатываемый управляющим блоком системы. Режим временной приостановки работы автомата может быть достаточно длительным. За это время в памяти автомата также могут возникать мягкие отказы. С целью организовать самовосстановление памяти автомата в этом режиме выходные сигналы *Q* с выхода блока *М1* поступают не только на входы комбинационной схемы *КС1*, но и на вход мультиплексора *MUX*. При этом если $ENA = 0$, каждый такт происходит самовосстановление памяти *П*.

Для уменьшения влияния ложных сигналов на выходах *КС1*, подключенных к информационным входам триггеров памяти автомата, предложен следующий способ. Как было отмечено [5], ложный импульс, поступающий на информационный вход триггера, может изменить его состояние, если этот импульс попадает в интервал $\tau = t_{SU} + t_H$ (t_{SU} — время предустановки триггера, t_H — время удержания триггера), на практике составляющий около 10 % от периода T_C тактовых сигналов. В троированной схеме памяти автомата *П* (см. рис. 2) в цепь передачи синхроимпульсов *C* введены элементы задержки: $\tau_1 = \tau$ для экземпляра памяти *П2* и $\tau_2 = 2\tau$ для экземпляра *П3*. Благодаря этому переключение всех триггеров в *П2* происходит по сравнению с *П1* с задержкой τ , а в *П3* — с задержкой 2τ .

Принцип использования задержек τ_1 и τ_2 проиллюстрирован на рис. 4, где:

— *D* — сигнал на информационных входах *D* триггеров блока памяти *П* (см. рис. 2);



■ **Рис. 4.** Принцип уменьшения влияния ложных сигналов на выходах КС1
 ■ **Fig. 4.** The principle of the minimization of spurious pulses on CS1 outputs

— $C1, C2, C3$ — входы синхронизации C экземпляров блока памяти П1, П2, П3 соответственно (см. рис. 2);

— T_C — период синхронизации триггеров.

На входы D поступает кратковременный ложный импульс длительностью $t_{л.и}$. Для каждого экземпляра блока памяти (П1, П2, П3) существует временной интервал (1, 2 и 3 соответственно) длительностью $t_{SU} + t_{H'}$, в течение которого сигнал на входе D влияет на состояние триггеров данного экземпляра. Эти интервалы между собой не пересекаются из-за внесенных задержек τ_1, τ_2 . Таким образом, ложный импульс, попадающий только в интервал 1 (как изображено на рис. 4), вызывает мягкий отказ в П1, но не оказывает влияние на П2 и П3. А поскольку выходы троированного блока памяти П подключены к мажоритару М1, мягкий отказ в одном из экземпляров блока памяти не вызывает искажение выходного вектора Q . Таким образом, распространение мягкого отказа заблокировано.

Искажение состояния троированной памяти может произойти только в том случае, если в течение одного такта ложный сигнал на входах D захватит минимум два интервала длительностью $t_{SU} + t_{H'}$, отмеченных выше. Назовем это сложное событие возникновением неисправленного отказа в памяти из-за ложных сигналов на входе D . Оценим вероятность $P_{н.о D}$ этого события и эффективность предложенного способа как

$$P_{н.о D} = \left(P_{л.с D} \frac{\tau}{T_C} \right)^2,$$

где $P_{л.с D} \frac{\tau}{T_C}$ — вероятность появления ложного сигнала на информационном входе D в течение одного такта и попадания его в интервал τ при спаде импульса C .

Ясно, что $\left(P_{л.с D} \frac{\tau}{T_C} \right)^2 \ll 1$. Поэтому воздействие ложных импульсов на входе D на работу автомата практически исключается. Из этого следует, что данный способ намного эффективнее известных, изложенных в работах [18–20] и рассмотренных в статье [5].

Аналогичный способ введения задержек ($\tau_3 = \tau, \tau_4 = 2\tau$) в цепь передачи синхроимпульсов предлагается использовать и в блоке БРО.

Анализ надежности и сложности реализации автомата Мура с троированием, мажорированием и самовосстановлением

По аналогии с исследованием, проведенным в работе [5], оценим вероятность сохранения автоматом работоспособности в течение времени T_3 решения задачи и сложности реализации структуры автомата (выраженную в числе логических элементов). Считается, что все отказы в элементах автомата являются мягкими (восстанавливаемыми), возникающими по причине попадания заряженных частиц в транзисторы автомата с некоторой известной интенсивностью $q_{п.ч.т}$. Работоспособность автомата считается утрачен-

ной, если на выход автомата Y (см. рис. 2) поступают искаженные данные.

Оценку проведем для частного примера конечного автомата [5], где известны:

- сложность реализации исходного блока памяти Π : $C_{\Pi} = 30$;
- сложность реализации комбинационной схемы $КС1$: $C_{КС1} = 54$;
- сложность реализации комбинационной схемы $КС2$: $C_{КС2} = 88$;
- сложность реализации одноразрядного мажоритара: $C_M = 6$;
- сложность реализации одноразрядного мультиплексора 2 в 1 : $C_{MUX} = 4$;
- количество бит в блоке памяти Π : $s = 3$;
- интенсивность появления ложных импульсов на выходах $КС1$: $3,4q_{п.ч.т}$;
- интенсивность появления ложных импульсов на выходах одноразрядного мультиплексора 2 в 1 : $1,25q_{п.ч.т}$;
- отношение суммарного времени предустановки и удержания триггера к длительности периода синхронизации, выраженное коэффициентом $K = 0,15$.

При оценке не будем рассматривать БРО (см. рис. 2), так как он реализует дополнительную функцию, не связанную с решением основной задачи автоматом. С учетом этого исследуемая структура состоит из комбинационных схем $КС1$, $КС2$, троированной памяти состояния автомата (сложности C_{Π}), мажорирующего элемента разрядности $s = 3$ (сложности C_M) и мультиплексора (сложности C_{MUX}) на две шины разрядности s . Общая сложность структуры

$$C_a = C_{КС1} + C_{КС2} + 3C_{\Pi} + s \times C_M + s \times C_{MUX} = 54 + 88 + 3 \times 30 + 3 \times 6 + 3 \times 4 = 178.$$

Для оценки надежности структуры проанализируем, в результате чего может исказиться выходной сигнал автомата. Основной причиной являются мягкие отказы в элементах памяти, которые приведут к потере работоспособности, если за один такт работы автомата в одинаковых битах двух различных экземпляров памяти Π произойдет мягкий отказ. В противном случае побитный мажоритар $M1$ по цепи обратной связи передаст корректные данные на входы $\Pi1$, $\Pi2$, $\Pi3$, и на следующем такте состояние памяти будет автоматически восстановлено. Для получения оценки вероятности отказа в памяти ограничимся рассмотрением ситуаций, когда за такт работы автомата возникает от нуля до трех отказов (остальными случаями пренебрежем, так как вероятность их возникновения на несколько порядков меньше). Тогда, обозначив событие мягкого отказа бита памяти за $A_{\Pi i, j}$, а событие отсутствия мягкого отказа за $\bar{A}_{\Pi i, j}$ (где i — номер

экземпляра памяти, j — порядковый номер бита памяти в экземпляре), рассмотрим возможные комбинации событий, которые приведут к отказу блока памяти.

В условиях текущей задачи каждый блок памяти содержит три информационных бита ($s = 3$). В случае отсутствия искаженных бит памяти либо при наличии только одного искаженного бита отказа рассматриваемой структуры не происходит. При наличии двух искаженных бит к отказу приведут следующие комбинации: $A_{\Pi 1, 1}A_{\Pi 2, 1}$, $A_{\Pi 1, 1}A_{\Pi 3, 1}$, $A_{\Pi 2, 1}A_{\Pi 3, 1}$, $A_{\Pi 1, 2}A_{\Pi 2, 2}$, $A_{\Pi 1, 2}A_{\Pi 3, 2}$, $A_{\Pi 2, 2}A_{\Pi 3, 2}$, $A_{\Pi 1, 3}A_{\Pi 2, 3}$, $A_{\Pi 2, 3}A_{\Pi 3, 3}$, $A_{\Pi 1, 3}A_{\Pi 3, 3}$. Итого девять комбинаций для случая двух искаженных бит. При наличии трех искаженных бит к отказу приводят 57 возможных комбинаций событий.

Общую вероятность возникновения отказа в памяти автомата оценим как сумму вероятностей возникновения рассмотренных несовместных комбинаций событий одновременного отказа двух или трех бит в блоке памяти:

$$P_{м.о.а} = 9(P_{м.о.бита})^2(1 - P_{м.о.бита})^7 + 57(P_{м.о.бита})^3(1 - P_{м.о.бита})^6. \quad (1)$$

Определим зависимость вероятности искажения бита данных в памяти $P_{м.о.бита}$ в (1) от интенсивности $q_{п.ч.т}$ попадания заряженной частицы в транзистор автомата. Причин, вследствие которых может возникнуть искажение, две. Первая — попадание заряженной частицы непосредственно в область памяти. Так как один бит памяти реализуется триггером, состоящим из пяти транзисторов, интенсивность возникновения этого события равна $5q_{п.ч.т}$. Вторая причина — запись искаженной информации вследствие попадания заряженной частицы в элементы $КС1$ или MUX , подключенные к соответствующему биту памяти. Исходя из расчетов, произведенных в работе [5], интенсивность появления ложных импульсов на выходах $КС1$ равна $3,4q_{п.ч.т}$, а на выходах мультиплексора — $1,25q_{п.ч.т}$. Для оценки интенсивности появления ложных импульсов, оказывающих влияние на Π , эти величины необходимо умножить на коэффициент $K = 0,15$, так как элементы $КС1$ и MUX влияют на работу памяти только в момент спада синхроимпульса. Суммарная интенсивность искажений одного бита данных соответственно равна $5q_{п.ч.т} + 0,15(3,4q_{п.ч.т} + 1,25q_{п.ч.т}) = 5,7q_{п.ч.т}$. Исходя из этого вероятность искажения бита памяти $P_{м.о.бита}$ в течение одного такта синхронизации T_C автомата выражается через интенсивность попадания заряженной частицы в транзистор $q_{п.ч.т}$ следующим образом:

$$P_{м.о.бита} = 1 - e^{-5,7q_{п.ч.т}T_C}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1), оценим вероятность отказа всей структуры в течение одного такта работы автомата:

$$\begin{aligned}
 P_{o.a} &= 9e^{-39,9q_{п.ч.т}T_C}(1 - e^{-5,7q_{п.ч.т}T_C})^2 + \\
 &+ 57e^{-34,2q_{п.ч.т}T_C}(1 - e^{-5,7q_{п.ч.т}T_C})^3 = \\
 &= -48e^{-51,3q_{п.ч.т}T_C} + 153e^{-45,6q_{п.ч.т}T_C} - \\
 &- 162e^{-39,9q_{п.ч.т}T_C} + 57e^{-34,2q_{п.ч.т}T_C}.
 \end{aligned}$$

Поскольку в начале каждого такта происходит восстановление состояния системы, вероятность безотказной работы автомата $P_{o.a}(n)$ в течение n последовательных тактов вычисляется как произведение вероятностей безотказной работы в течение каждого такта:

$$\begin{aligned}
 \overline{P_{o.a}}(n) &= (1 - P_{o.a})^n = (1 + 48e^{-51,3q_{п.ч.т}T_C} - \\
 &- 153e^{-45,6q_{п.ч.т}T_C} + 162e^{-39,9q_{п.ч.т}T_C} - \\
 &- 57e^{-34,2q_{п.ч.т}T_C})^n.
 \end{aligned}$$

Оценка полученных результатов

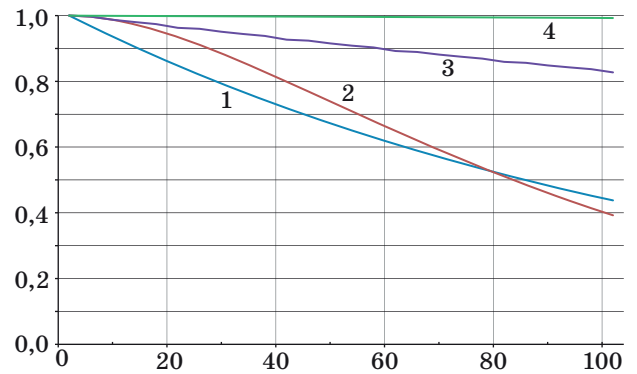
В работе [5] была произведена оценка вероятности безотказной работы различных отказоустойчивых структур автомата Мура при следующих условиях:

- интенсивность попадания заряженных частиц в один транзистор: $q_{п.ч.т} = 0,0005$;
- общее время, необходимое для полного решения задачи: $T_3 = 100$;
- время одного рабочего цикла автомата: $T_{ц} = 10$;
- время одного такта работы автомата: $T_C = 1$.

Для структуры, предложенной в данной работе (структура 4), построим график функции вероятности безотказной работы (3) на интервале T_3 ($n = 100$ тактов) и сравним ее с результатами, полученными для известных структур (рис. 5):

- структура 1 — автомат без структурного резервирования (см. рис. 1);
- структура 2 — автомат с троированными блоками и троированными входными мажоритарными без периодического восстановления информации;
- структура 3 — автомат с троированными блоками и троированными входными мажоритарными и периодическим восстановлением информации. Восстановление искаженного состояния происходит за счет формирования сигнала начальной установки в конце каждого цикла работы автомата (период восстановления соответствует длительности цикла алгоритма работы автомата).

Ось абсцисс обозначает текущее время t решения задачи. По оси ординат расположена вероятность нахождения автомата в работоспособном



■ Рис. 5. Функции работоспособности анализируемых структур

■ Fig. 5. The reliability function of the analyzed structures

- Сложность реализации анализируемых структур
- The structural complexity of the analyzed structures

| Структура | Сложность реализации (количество логических элементов) |
|-----------|--|
| 1 | 88 |
| 2 | 336 |
| 3 | 336 |
| 4 | 178 |

состоянии (1 — гарантированно работоспособен, 0 — гарантированно неработоспособен).

Итоговая вероятность успешного решения задачи для предложенной структуры 4 равна 0,99. Аналогичная величина, рассчитанная для структуры 3 (показавшей в статье [5] лучшие характеристики надежности), равна 0,84, что наглядно демонстрирует преимущество предложенной структуры при работе в условиях мягких отказов. Это превосходство обеспечивается меньшим по сравнению со структурой 3 периодом восстановления — оно происходит на каждом такте, а не только по окончании цикла работы алгоритма.

При этом предложенная структура также имеет по сравнению со структурой 3 меньшую сложность реализации (таблица).

Оценивая сложность реализации, помимо количества логических элементов также полезно учитывать и количество линий связи между структурными блоками. В структурах 2 и 3 это количество втрое увеличено по сравнению с исходной структурой 1 (по причине полного троирования автомата). В структуре 4 троирован только блок памяти, поэтому избыточные линии связи отсутствуют.

Заключение

На основе анализа проведенных ранее исследований определены направления разработки схемотехнических решений для конечного автомата с памятью, работающего в условиях потока мягких отказов.

Разработана структура автомата Мура с троированием памяти, мажорированием выходных сигналов памяти и восстановлением информации в каждом такте (см. рис. 2), которая обладает повышенной защитой от ложных импульсов, возникающих по причине попадания частиц высокой энергии в области комбинационных схем и памяти состояний автомата, а также оснащена средствами регистрации количества мягких отказов, произошедших в ходе эксплуатации.

Для разработанной структуры на примере показана методика расчета, позволяющая при известной радиационной обстановке (интенсив-

ности попадания частиц высокой энергии в транзисторы) оценить вероятность работоспособности автомата в заданном интервале времени.

Получены оценки надежности и структурной сложности для примера разработанной структуры. Сравнение полученных оценок с аналогичными, рассчитанными для известных отказоустойчивых реализаций автомата Мура, показало превосходство предложенной структуры как с точки зрения надежности при воздействии потока мягких отказов, так и структурной сложности.

Предложенная структура позволяет также реализовать дополнительные функции детектирования отказов, возникающих в автомате. Следовательно, становится возможным непосредственно в ходе работы автомата оценивать степень его деградации и при выходе за границы безопасной эксплуатации осуществлять аварийную остановку устройства.

Литература

1. **Егоров И. В., Мелехин В. Ф.** Анализ проблемы повышения радиационной стойкости информационно-управляющих систем на этапе функционально-логического проектирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 26–31. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.26
2. **Егоров И. В., Мелехин В. Ф.** Методы и средства анализа надежности структурных блоков с резервированием и периодическим восстановлением информации на различных этапах проектирования вычислительных систем // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 26–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.26
3. **Егоров И. В., Мелехин В. Ф.** Анализ процессов в конечном автомате при воздействии радиации. Оценка вероятности искажения информации // Информационно-управляющие системы. 2016. № 3. С. 24–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.24
4. **Kaeslin H.** Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication. — Cambridge University Press, 2008. <http://www.roletech.net/books/DigitalIntegratedCircuit.pdf> (дата обращения: 10.04.2016).
5. **Егоров И. В., Мелехин В. Ф.** Анализ показателей надежности и сложности реализации различных вариантов структур автомата с памятью при потоке мягких отказов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3. С. 34–46. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.34
6. **Edmonds L. D., Barnes C. E., Scheick L. Z.** An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics. — JPL publication 00-06, 2000. — 83 p. <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/NASA-Generic/JPL-00-06.pdf> (дата обращения: 05.12.2015).
7. **James R. Schwank, Marty R. Shaneyfelt, Paul E. Dodd.** Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. Vol. 60. N 3. P. 2074–2100.
8. **Hass K. J., Ambles J. W.** Single Event Transients in Deep Submicron CMOS // 42nd Midwest Symp. on Circuits and Systems. 2000. Vol. 1. P. 122–125.
9. **Benedetto J. M., et al.** Variation of Digital SET Pulse Widths and the Implications for Single Event Hardening of Advanced CMOS Processes // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2005. Vol. 52. P. 2114–2119.
10. **Jacob A. Abraham, Daniel P. Siewiorek.** An Algorithm for the Accurate Reliability Evaluation of Triple Modular Redundancy Networks // IEEE Transactions on Computers. 1974. Vol. C-23. N 7. P. 682–692.
11. **Максименко С. Л., Мелехин В. Ф.** Анализ надежности функциональных узлов цифровых СБИС со структурным резервированием и периодическим восстановлением работоспособного состояния // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 18–23.
12. **Gaillard R.** Single Event Effects Mechanisms and Classification // Frontiers in Electronic Testing. 2011. Vol. 41. P. 27–54.
13. **Amusan O. A., Massengill L. W., Baze M. P., Sternberg A. L., Witulski A. F., Bhuvu B. L., Black J. D.** Single Event Upsets in Deep-Submicrometer Technologies due to Charge Sharing // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2008. Vol. 8. N 3. P. 582–589.
14. **Мурора С.** Системное проектирование сверхбольших интегральных схем. Кн. 1. — М.: Мир, 1985. — 288 с.

15. Пат. 174640 RU, МПК G06F 11/07 (2006.01). Отказоустойчивый цифровой преобразователь информации для управления дискретными процессами / И. В. Егоров (RU), В. Ф. Мелехин (RU). — № 174640/25–08; заявл. 14.06.2017; опубл. 24.10.2017, Бюл. № 30. — 7 с.
16. Максименко С. Л., Мамутова О. В., Филиппов А. С., Мелехин В. Ф. Методология проектирования восстанавливаемых встраиваемых вычислительных систем // Университетский научный журнал. 2014. № 8. С. 144–153.
17. Максименко С. Л., Мелехин В. Ф., Филиппов А. С. Анализ проблемы построения радиационно-стойких информационно-управляющих систем // Информационно-управляющие системы. 2012. № 2. С. 18–25.
18. Eaton P., Benedetto J., Mavis D., Avery K., Sibley M., Gadlage M., Turflinger T. Single Event Transient Pulsewidth Measurements Using a Variable Temporal Latch Technique // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 2004. Vol. 51. N 6. P. 3365–3368.
19. Rollins N., Wirthlin M., Caffrey M., Graham P. Evaluating TMR Techniques in the Presence of Single Event Upsets // Proc. of the 6th Annual Intern. Conf. on Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD), Washington, D.C. Sept. 2003. <http://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2047&context=facpub> (дата обращения: 05.08.2016).
20. She Xiaoxuan, Samudrala P. K. Selective Triple Modular Redundancy for Single Event Upset (SEU) Mitigation // Adaptive Hardware and Systems: NASA/ESA Conf. 2009. P. 344–350.

UDC 681.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.18

Organizing a Finite State Machine with Higher Resistance to Soft Failures and Soft Failure RegistrationEgorov I. V.^a, Post-Graduate Student, iegorov@kspt.icc.spbstu.ruMelekhin V. F.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, melekhin@kspt.ftk.spbstu.ru^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Up-to-date design rules used in computer engineering make hardware unreliable when working under radiation. A hit of a charged particle causes a «soft failure», i.e. a situation when the hardware is still usable but the information transmitted through it or stored in it is corrupted. Some research revealed that soft failures occur more often in memory units than in combinational circuits. This is why the known engineering solutions like structural redundancy are not efficient enough in the case of soft failures. **Purpose:** Developing new circuitry solutions for a finite state machine experiencing a flow of soft failures. **Results:** The developed structure of a Moore automaton with triple redundancy of its internal memory, double redundancy of its output signals and self-recovery on each synchronization clock period has a higher resistance to soft errors which can occur in its combinational circuits or internal memory. The structure also contains tools to count the soft failures during its functioning. A technique is proposed to estimate the reliability and structural complexity of the developed structure.

Keywords — Finite State Machine, Combinational Circuit, Reliability Analysis, Hardware Complexity Estimation, Synchronization, Soft Failures, Structural Redundancy, Recoverable System, Probability of Non-Failure.

Citation: Egorov I. V., Melekhin V. F. Organizing a Finite State Machine with Higher Resistance to Soft Failures and Soft Failure Registration. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 18–27 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.18

References

- Egorov I. V., Melekhin V. F. Analysis of Radiation Resistance Improvement Issue for Information and Control Systems at the Stage of Functional and Logical Design. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 26–31 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.26
- Egorov I. V., Melekhin V. F. Methods and Tools for Structural Block Reliability Analysis with Reservation and Periodic Information Recovery at Various Stages of Computing System Design. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 26–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.26
- Egorov I. V., Melekhin V. F. Analysis of Processes in a Finite State Machine under Radiation. Probabilistic Assessment of Information Distortion. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 23–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.23
- Kaeslin H. *Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication*. Cambridge University Press, 2008. Available at: <http://www.roletech.net/books/DigitalIntegratedCircuit.pdf> (accessed 10 April 2016).
- Egorov I. V., Melekhin V. F. Analysis of Reliability Characteristics for Various Structures of a Finite State Machine Working in Case of Soft-Failure Flow. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 3, pp. 34–46 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.34
- Edmonds L. D., Barnes C. E., Scheick L. Z. *An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics*. JPL publication, 2000, no. 00-06. 83 p. Available at: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/NASA-Generic/JPL-00-06.pdf> (accessed 05 December 2015).
- James R. Schwank, Marty R. Shaneyfelt, Paul E. Dodd. Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, vol. 60, no. 3, pp. 2074–2100.
- Hass K. J., Ambles J. W. Single Event Transients in Deep Submicron CMOS. *42nd Midwest Symp. on Circuits and Systems*, 2000, vol. 1, pp. 122–125.

9. Benedetto J. M., et al. Variation of Digital SET Pulse Widths and the Implications for Single Event Hardening of Advanced CMOS Processes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, vol. 52, pp. 2114–2119.
10. Jacob A. Abraham, Daniel P. Siewiorek. An Algorithm for the Accurate Reliability Evaluation of Triple Modular Redundancy Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 1974, vol. C-23, no. 7, pp. 682–692.
11. Maximenko S. L., Melekhin V. F. Analysis of Reliability of Functional Nodes of Digital VLSI Circuits with Structural Redundancy and Periodic Operational State Recovery. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2, pp. 18–23 (In Russian).
12. Gaillard R. Single Event Effects Mechanisms and Classification. *Frontiers in Electronic Testing*, 2011, vol. 41, pp. 27–54.
13. Amusan O. A., Massengill L. W., Baze M. P., Sternberg A. L., Witulski A. F., Bhuvva B. L., Black J. D. Single Event Upsets in Deep-Submicrometer Technologies due to Charge Sharing. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 582–589.
14. Muroga S. *Sistemnoe proektirovanie sverkhbol'shikh integral'nykh skhem. Kn. 1* [System Design of Very-Large-Scale Integrated Circuits. Book 1]. Moscow, Mir Publ., 1985. 288 p. (In Russian).
15. Egorov I. V., Melekhin V. F., et al. *Otkazoustojchivyyj cifrovoj preobrazovatel' informacii dlja upravlenija diskretnymi processami* [The Failure-Safe Information Digitizer for Management of Discrete Processes]. Patent RU, no. 174640, 2017.
16. Maximenko S. L., Filippov A. S., Melekhin V. F., Mamoutova O. V. Design Methodology for Embedded Systems with Built-in Self-Recovery. *Universitetskii nauchnyi zhurnal*, 2014, no. 8, pp. 144–153 (In Russian).
17. Maximenko S. L., Melekhin V. F., Filippov A. S. Analysis of the Problem of Radiation-Tolerant Information and Control-Systems Implementation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 2, pp. 18–25 (In Russian).
18. Eaton P., Benedetto J., Mavis D., Avery K., Sibley M., Gadlage M., Turflinger T. Single Event Transient Pulsewidth Measurements Using a Variable Temporal Latch Technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Dec. 2004, vol. 8, no. 6, pp. 3365–3368.
19. Rollins N., Wirthlin M., Caffrey M., Graham P. Evaluating TMR Techniques in the Presence of Single Event Upset. *Proc. of the 6th Annual Intern. Conf. on Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD)*, Washington, D.C., Sept. 2003. Available at: <http://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2047&context=facpub> (accessed 05 August 2016).
20. She Xiaoxuan, Samudrala P. K. Selective Triple Modular Redundancy for Single Event Upset (SEU) Mitigation. *NASA/ESA Conf. "Adaptive Hardware and Systems"*, 2009, pp. 344–350.

УДК 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.28

ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. Ю. Кучмин^а, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, radiotelescope@yandex.ru

^аИнститут проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Введение: современные тенденции для решения задач идентификации — это применение методов с множественно-функциональным подходом, позволяющим рассматривать задачу идентификации как задачу математического программирования большой размерности, что в дальнейшем дает возможность использовать стандартные методы решения подобных задач. **Цель:** разработка новых методов для идентификации линейных и нелинейных нестационарных динамических объектов. **Результаты:** предложены модификации статистических идентификаторов на основе метода наименьших квадратов с применением оператора сдвига во временной области для разностных фильтров. Для случая низкого отношения сигнал/шум дано описание процесса идентификации как системы неравенств на основе множественно-функционального подхода, позволяющего при использовании интервальной невязки между выходом идентификатора и реальным динамическим объектом проводить редукцию модели. Для случая нелинейных систем с использованием множественно-функционального подхода предложена постановка задачи идентификации, основанная на анализе типов асимптотических решений при учете физических закономерностей и соответствующих ограничений на параметры и фазовые координаты. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при синтезе систем управления с идентификаторами и при построении моделей нестационарных и нелинейных динамических систем. Методика определения парциальных жесткостей может применяться для анализа и синтеза базовых блоков интеллектуальных электромеханических систем.

Ключевые слова — метод наименьших квадратов, идентификация, интеллектуальные электромеханические системы.

Цитирование: Кучмин А. Ю. Проблемы идентификации нестационарных динамических объектов// Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 28–35. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.28

Citation: Kuchmin A. Yu. Identification of Non-Stationary Dynamic Objects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 28–35 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.28

Введение

При решении задач управления, изучении новых процессов систем, анализе сигналов и изображениях широко применяются математические модели. В современной теории управления математическим моделям отведено центральное место. Сформулируем основную цель построения математической модели системы: необходимо либо в символьном (формулы), либо численном (характеристики) виде, удобном для восприятия и анализа человеком с одной стороны, и реализации средствами вычислительной техники с другой, аппроксимировать с некоторой погрешностью, выбранной исходя из условий задачи, процессы, протекающие в системе. От выбора математической модели во многом зависит дальнейший ход исследований системы, так что на практике желательно получить ее четкое математическое описание таких упрощенной структуры и малой размерности, при которых не нарушается его адекватность натуре.

Построение модели — это чисто интуитивный процесс, сводящийся к формированию структуры модели с последующей настройкой ее параметров. Настройка или определение параметров реализуется на основе применения регулярных

математических методов. В условиях априорной неопределенности интуиция является одной из составляющих процесса принятия решения о структуре модели [1].

Центральной проблемой построения адекватных реальному объекту моделей является идентификация не только параметров объекта, но и его структуры и состояния, что представляет в общей постановке нелинейную задачу математического программирования большой размерности даже для случая линейного нестационарного динамического объекта (ДО) [2–4]. Поэтому задачу идентификации для упрощения принято разбивать на ряд взаимосвязанных стадий: определение структуры модели, параметров и состояния. Данная статья сфокусирована на модификации методов на базе наименьших квадратов [2, 5] и множественно-функциональных методах [1, 6].

Основные проблемы идентификации нестационарных ДО управления

Методы идентификации можно отнести к ряду оптимизационных задач, которые требуют сложных вычислений и специализированных

аппаратных средств для их реализации. До недавнего времени применение подобных подходов в реальных задачах сдерживалось именно по этой причине. В качестве поворотного момента можно отметить появление метода последовательного обучения [5], который дал возможность описывать сложные нелинейные системы в виде многослойной сетевой структуры. Позднее данный подход был реализован в нейросетевых технологиях. Нейронные сети были известны в 50-х гг. прошлого века, но как эффективный инструмент не получили развития вплоть до 80-х гг. в связи с отсутствием действенных методов их обучения и средств аппаратной реализации. Например, основной метод обучения нейронных сетей «метод обратного распространения ошибки» может рассматриваться как частный случай применения метода последовательного обучения к структуре «многослойный персептрон» [7].

В последнее время существует тенденция рассматривать идентификацию не как самостоятельное научное направление, а как составную часть нейросетевых технологий в роли некоего вспомогательного инструмента. К сожалению, в таком контексте теория идентификации представляется в некотором искаженном и неполном виде, без исследования особенностей методов идентификации и возможности их применимости в тех или иных ситуациях. Нейроинформатика — это молодое направление, которое находится в стадии формирования своей парадигмы; к сожалению, на этом этапе очень мало внимания уделяется именно вопросам развития идентификации. Зачастую придумываются новые виды нейросетевых структур, а уже после этого исследуются вопросы их обучения и возможности применения. Центральным свойством нейронной сети выбрана ее избыточность, которая позволяет аппроксимировать различные системы, в чем заключается ее способность предсказывать их реакции. Можно выделить две основные проблемы при синтезе нейронных сетей и их обучении — переобучение и недостаточную размерность сети [4, 7].

В нейросетевых технологиях идентификация разделена на три основных направления: определение топологии сети, методы обучения и предварительная обработка данных (препроцессинг). Зачастую топология сети выбирается для конкретной задачи исходя из накопленного опыта применения подобного вида сетей на практике. Очень сложно провести сравнение эффективности применения нейронных сетей разных структур для решения одной и той же задачи. Хорошо развитых математических методов выбора топологий нейронных сетей и их сравнения не разработано. Основным практическим подходом является использование комбинированных (мо-

дульных) сетей, которые состоят из нейросетевых подсистем разных топологий, направленных на одну и ту же задачу, решение которой принимается методом голосования. В качестве методов обучения применяются стандартные методы теории оптимизации или теории идентификации, адаптированные для определенного вида сетей. Препроцессинг — предварительная обработка данных, позволяющая выделить основные аспекты сигналов, удалить шумы и перевести данные в базис, удобный для дальнейшего использования в нейронных сетях.

Все существующие подходы к идентификации можно разбить на две группы: множественно-функциональные и статистические. Такое деление обусловлено различиями в учете возмущений, действующих на систему. Широко используемым является статистический подход, основанный на оценивании параметров и состояния ДО. Его недостатком является жестко формулируемая структура модели объекта на этапе проектирования как результат субъективного выбора экспертом моделей из заданного класса. «Нежесткость» учитывается случайным характером неопределенных факторов и помех, модели которых задаются в виде законов распределения. Следствием является необходимость использовать большие объемы данных с высокой информационной насыщенностью, что редко достигается в реальных сложных физико-технических системах. Большинство методов в своей основе опирается на различные модификации метода наименьших квадратов (МНК) и требует мощных вычислительных средств, разработки стабильных методов оценки вероятностных характеристик возмущений. Такие методы малоэффективны для случая нестационарных ДО и при наличии ограничений на диапазоны изменений оцениваемых параметров, так как теоретические предпосылки, лежащие в основе указанных методов, не выполняются.

Идентификация линейных нестационарных динамических объектов

Для анализа потоковых данных в информационно-измерительных и управляющих системах со статистическими идентификаторами существует проблема выбора временных интервалов «плавающего окна», которая носит алгоритмический характер и плохо формализуется для аналитического исследования. Практические исследования данных с нестационарных ДО показали, что есть возможность для дискретного описания подобных ДО ввести матричный оператор сдвига во временной области:

$$\mathbf{A}^\tau = \begin{cases} \mathbf{A}^{\text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right)} \left[1 - \frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right] + \\ + \left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi} - \text{fix}\left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right) \mathbf{A}^{\text{fix}(\tau)+1}, \tau \geq 0 \\ (\mathbf{A}^\tau)^{\text{fix}(-\tau)} \left[1 + \frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{-\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right] + \\ + \left(\frac{\tau\omega_0}{2\pi} + \text{fix}\left(\frac{-\tau\omega_0}{2\pi}\right) \right) (\mathbf{A}^\tau)^{\text{fix}(-\tau)+1}, \tau < 0 \end{cases},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n},$$

где τ — сдвиг во временной области; ω_0 — частота дискретизации по времени; $\text{fix}(\dots)$ — функция округления с отбрасыванием дробной части; n — число отсчетов в окне выборки. Например, для задачи оценивания параметров разностного фильтра

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} x[t_k - \tau_{i_1}] + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} b_{i_2,i_3} u_{i_2}[t_k - \tau_{i_2,i_3}] = 0,$$

где a_{i_1}, b_{i_2,i_3} — коэффициенты фильтра; i_1, i_2, i_3 — соответствующие индексы; m_1, m_2, m_{3,i_2} — максимальные значения индексов; x — выходная координата; t_k — текущий момент времени; $\tau_{i_1}, \tau_{i_2,i_3}$ — временные сдвиги; u_{i_2} — управляющие воздействия, можно использовать компактную аналитическую запись

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} \mathbf{A}^{-\tau_{i_1}} \mathbf{x} a_{i_1} + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \mathbf{A}^{-\tau_{i_2,i_3}} \mathbf{u}_{i_2} b_{i_2,i_3} = \boldsymbol{\varepsilon};$$

$$\mathbf{F}\mathbf{p} = \boldsymbol{\varepsilon},$$

$$\left[a_0, a_1, \dots, a_{m_1}, b_{1,0}, b_{1,1}, \dots, b_{m_2,m_{3,m_2}} \right]^T = \mathbf{p};$$

$$\left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x}, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}, \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1, \right.$$

$$\left. \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_2,m_{3,m_2}}} \mathbf{u}_{m_2} \right] = \mathbf{F}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}, \mathbf{u}_{i_2}, \boldsymbol{\varepsilon}$ — соответствующие векторы отсчетов выходной координаты, управляющих воздействий и невязок; \mathbf{p} — вектор оцениваемых параметров. Переход к виду (1) позволяет использовать методы МНК-идентификаторов и найти оценки параметров фильтра через минимизацию целевой функции $J(\mathbf{p}) = \mathbf{p}^T \mathbf{H} \mathbf{p}$. Анализ собственных чисел матрицы $\mathbf{H} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ позволяет выполнить редукцию исходной модели с учетом апри-

орных ограничений на частотный диапазон и информационную насыщенность данных.

В случае низкого соотношения сигнал/шум и низкой информационной насыщенности данных целесообразно перейти от описания (1) к системе линейных неравенств с учетом интервальной оценки β рассогласования $\boldsymbol{\varepsilon}$ между измеренными значениями выходной координаты ДО и полученными с модели:

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\beta_1) \mathbf{p} \geq 0 \\ \mathbf{F}(\beta_2) \mathbf{p} \leq 0 \end{cases} \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} \geq 0 \text{ или}$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\beta_1) \mathbf{p} \leq 0 \\ \mathbf{F}(\beta_2) \mathbf{p} \geq 0 \end{cases} \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} \leq 0;$$

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} \left[\mathbf{A}^{-\tau_{i_1}} \mathbf{x} + \mathbf{I} \boldsymbol{\varepsilon} \right] a_{i_1} +$$

$$+ \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \mathbf{A}^{-\tau_{i_2,i_3}} \mathbf{u}_{i_2} b_{i_2,i_3} = 0, \boldsymbol{\varepsilon} \in \beta = [\beta_1 \quad \beta_2],$$

$$\mathbf{F}(\beta) = \left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi} \beta, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi} \beta, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \boldsymbol{\xi} \beta, \right.$$

$$\left. \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1, \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{A}^{-\tau_{m_2,m_{3,m_2}}} \mathbf{u}_{m_2} \right], \quad (2)$$

где \mathbf{I} — единичная матрица; $\boldsymbol{\xi}$ — вектор из единиц. Модель (2) может рассматриваться как множествонно-функциональное описание МНК-подхода.

Такое аналитическое описание может быть расширено на случай нестационарных фильтров:

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} a_{i_1} [t_k] x[t_k - \tau_{i_1}] +$$

$$+ \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} b_{i_2,i_3} [t_k] u_{i_2} [t_k - \tau_{i_2,i_3}] = 0. \quad (3)$$

Здесь нестационарные коэффициенты определяются как выходы динамических систем:

$$\sum_{j_1=0}^{m_4} \mu_{i_1,j_1} a_{i_1} [t_k - \tau_{j_1}] = 0;$$

$$\sum_{j_2=0}^{m_5} \mu_{i_2,i_3,j_2} b_{i_2,i_3} [t_k - \tau_{j_2}] = 0, \quad (4)$$

где j_1, j_2 — соответствующие индексы, а m_4, m_5 — их максимальные значения; $\mu_{i_1,j_1}, \mu_{i_2,i_3,j_2}$ — коэффициенты соответствующих фильтров; τ_{j_1}, τ_{j_2} — временные сдвиги. Тогда для МНК-идентификатора будем иметь аналогичное выражение для целевой функции

$$J(\mathbf{p}) = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p})^T \mathbf{H}_\varphi \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{p}), \quad (5)$$

где

$$\mathbf{H}_\varphi = \mathbf{F}_\varphi^T \mathbf{F}_\varphi, \mathbf{F}_\varphi = \text{diag} \left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x}; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x}; \right. \\ \left. \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1; \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1; \dots; \mathbf{A}^{-\tau_{m_2, m_3, m_2}} \mathbf{u}_{m_2} \right],$$

а

$$\varphi = \left[\varphi_0(\mu_0, \mathbf{a}_0); \dots; \varphi_{m_1}(\mu_{m_1}, \mathbf{a}_{m_1}); \varphi_{1,0}(\mu_{1,0}, \mathbf{b}_{1,0}); \right. \\ \left. \dots; \varphi_{m_2, m_3, m_2}(\mu_{m_2, m_3, m_2}, \mathbf{b}_{m_2, m_3, m_2}) \right],$$

компоненты которого являются выходами моделей (4) и полиномиальными функциями от элементов из \mathbf{p} и определяются согласно

$$\sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\mu_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) x[t_k - \tau_{i_1}] + \\ + \sum_{i_2=1}^{m_2} \sum_{i_3=0}^{m_{3,i_2}} \varphi_{i_2, i_3}(\mu_{i_2, i_3}, \mathbf{b}_{i_2, i_3}, t_k) u_{i_2}[t_k - \tau_{i_2, i_3}] = \varepsilon[t_k],$$

где $\varepsilon[t_k]$ — текущая невязка; $\mu_{i_1}, \mu_{i_2, i_3}$ — оцениваемые параметры фильтра, $\mathbf{a}_{i_1}, \mathbf{b}_{i_2, i_3}$ — начальные значения оцениваемых параметров в (4). Параметры $\mu_{i_1}, \mu_{i_2, i_3}, \mathbf{a}_{i_1}, \mathbf{b}_{i_2, i_3}$ формируют вектор \mathbf{p} .

Посредством введения интервальной оценки β рассогласования ε между измеренными значениями выходной координаты ДО и полученными с модели задача сводится к системе полиномиальных неравенств

$$\begin{cases} \mathbf{F}_\varphi(\beta_1)\varphi(\mathbf{p}) \leq 0 \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta_2)\varphi(\mathbf{p}) \geq 0 \end{cases} \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\mu_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) \leq 0 \text{ или} \\ \begin{cases} \mathbf{F}_\varphi(\beta_1)\varphi(\mathbf{p}) \geq 0 \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta_2)\varphi(\mathbf{p}) \leq 0 \end{cases} \text{ при } \sum_{i_1=0}^{m_1} \varphi_{i_1}(\mu_{i_1}, \mathbf{a}_{i_1}, t_k) \geq 0, \\ \mathbf{F}_\varphi(\beta) = \text{diag} \left[\mathbf{A}^{-\tau_0} \mathbf{x} + \xi\beta; \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \xi\beta; \dots; \right. \\ \left. \mathbf{A}^{-\tau_1} \mathbf{x} + \xi\beta; \mathbf{A}^{-\tau_{1,0}} \mathbf{u}_1; \mathbf{A}^{-\tau_{1,1}} \mathbf{u}_1; \dots; \right. \\ \left. \mathbf{A}^{-\tau_{m_2, m_3, m_2}} \mathbf{u}_{m_2} \right]. \quad (6)$$

Одним из практических подходов к упрощению задач (5) и (6) является использование масштабирования модельного времени (т. е. введение частоты квантования по времени как функции переменных масштабных коэффициентов). При данном подходе предполагается, что модель объекта описывает стационарный ДО, но отсчеты берутся через разные промежутки времени. Тогда выражения (5) и (6) преобразуются к виду, где функции в векторе φ будут зависеть от переменных временных сдвигов и параметров стационарного фильтра. Например, в случае колебатель-

ных систем масштабные коэффициенты могут быть рассчитаны по изменению периодов колебания на интервале времени, в котором определяются отсчеты «плавающего окна».

Помимо МНК, в стохастической аппроксимации используются градиентные алгоритмы, например метод скоростного градиента А. Л. Фрадкова [8], однако в условиях сильных нерегулярных помех их эффективность не высока, так как сложно соблюсти условия их применимости (например, наличие нелинейных элементов, не относящихся к классу Лурье). Попыткой преодолеть эту проблему был учет в указанных методах ограничений, связанных с условиями функционирования системы «объект + среда», реализуемостью законов управления и физической адекватностью процессов в ДО. В качестве основной статистической модели используются наименее благоприятные распределения помехи. Такое описание является предельным и не учитывает реальные условия функционирования ДО, что снижает качество работы идентификаторов по конечным выборкам. Классическим примером подобного подхода является синтез фильтров Калмана, который сводится к задаче с квадратичным функционалом и, как следствие, к решению уравнения Риккати для нестационарного случая цветных помех. Данное решение затруднительно, так как сложно определить веса квадратичного функционала и плотности распределения помехи. Существует широкий класс высокоточных информационно-измерительных и управляющих систем ДО, для которого задание наименее благоприятных распределений возмущений не только снижает точность управления, но и может привести к потере устойчивости, а оценивание параметров не может быть описано как задача стохастической аппроксимации.

К недостаткам подобных методов стоит отнести невозможность использовать их для случаев совмещения спектральных характеристик ДО, неопределенных факторов и помехи, особенно когда спектральная характеристика ДО разнесена в разные частотные диапазоны.

Множественно-функциональные методы идентификации нестационарных ДО

Альтернативным подходом к МНК являются множественно-функциональные методы идентификации [8, 9]. Их цель сводилась к нахождению параметров модели методами вариационного исчисления и численными методами оптимизации. Здесь следует выделить такие подходы, как метод максимума Понтрягина, метод вариационного погружения и т. д. В большинстве случаев

идея подобных методов сводится к определению неизвестного набора параметров в результате максимизации (минимизации) некоего функционала (часто являющегося квадратичной формой между откликом реальной системы и выходом модели, параметры которой настраиваются) одним из известных методов оптимизации (методом Ньютона и его модификациями, симплекс-методом и т. д.) с учетом соответствующих ограничений, которые задают диапазоны изменения параметров системы и других величин и используются для контроля правильности модели и ее адекватности натуре. В качестве поворотного момента можно отметить появление метода последовательного обучения, что дало возможность описывать сложные нелинейные системы в виде многослойной сетевой структуры. Позднее данный подход был реализован в нейросетевых технологиях, что привело к тенденции рассматривать идентификацию с этих позиций не как самостоятельное направление, а как составную часть нейросетевых технологий в роли некоего вспомогательного инструмента. К сожалению, в таком контексте теория идентификации переносится в некотором искаженном и неполном виде, без исследования особенностей методов идентификации и возможности применимости в тех или иных ситуациях.

Такие множественно-функциональные методы позволяют описывать нестационарность и стохастичность ДО посредством сведения к «нежестким» моделям на основе интервальных методов и систем неравенств, в том числе целевых. Дается общая постановка задачи идентификации с определением структуры, параметров и состояния.

Введем $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ — функцию-метрику оценки качества модели, обладающую единственным экстремумом и гладкую. Часто в качестве $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ выбирают квадратичную форму координат или параметров, описывающую отклонения модели от измеренных данных ДО, $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ может быть выражена также в виде энергетического критерия, а для задач управления $J(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ может быть функцией Ляпунова. Модель нелинейного нестационарного ДО определим в общем виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}), \quad (7)$$

где \mathbf{p} — параметры ДО; \mathbf{x} — вектор состояния ДО; \mathbf{u} — управляющие воздействия; \mathbf{f} — возмущающие воздействия. Выберем

$$J(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{y}_0)^T \mathbf{M}(\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{y}_0) dt,$$

где \mathbf{C} — матрица измеряемых выходных величин системы; \mathbf{M} — нормировочная матрица, коэф-

фициенты которой находятся по диапазону изменения компонентов вектора измеряемых величин \mathbf{y}_0 . Для общего случая в (7) неизвестными являются как функция \mathbf{F} , так и часть компонент \mathbf{x} и аргументы \mathbf{p} и \mathbf{f} . Одним из стандартных подходов является аппроксимация (7) некоторой сетевой структурой, организующей численное разложение в определенный ряд, однако остается открытым вопрос выбора топологии такой структуры, базовых функций и адекватность такого описания физическим закономерностям. Невозможно оценить полноту и непротиворечивость таких моделей. С расчетом особенностей рассмотренных ДО была предложена постановка задачи идентификации, основанная на анализе типов асимптотических решений при учете физических закономерностей и соответствующих ограничений на параметры \mathbf{p} и \mathbf{f} , а также фазовые координаты \mathbf{x} . Тогда задача формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i &= \sum_{j=1}^n \varphi_j(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t), \quad \mathbf{v}_i = \sum_{j=1}^n \rho_j(\boldsymbol{\mu}_i, t), \\ \beta_1 \xi &\leq \mathbf{L}_i(\dot{\mathbf{z}}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) \leq \beta_2 \xi, \\ \mathbf{v}_{i,\min} &\leq \mathbf{v}_i \leq \mathbf{v}_{i,\max}, \\ \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{C}\mathbf{z}_i - \mathbf{y}_0)^T \mathbf{M}(\mathbf{C}\mathbf{z}_i - \mathbf{y}_0) dt &= \\ &= \mathbf{G}(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t) \leq \alpha \xi, \\ \mathbf{p}_{i,\min} &\leq \mathbf{p}_i \leq \mathbf{p}_{i,\max}, \quad \mathbf{z}_{i,\min} \leq \mathbf{z}_i \leq \mathbf{z}_{i,\max}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \mathbf{z}_i — асимптотические решения, аппроксимирующие \mathbf{x}_i таким образом, что $\mathbf{x}_i = \mathbf{z}_i + \boldsymbol{\varepsilon}$ ($\boldsymbol{\varepsilon}$ — погрешность модели); $\varphi_j(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t)$ — базисные функции решений (чаще полиномиальные или аппроксимирующиеся полиномами на основании теоремы Вейерштрасса; \mathbf{v}_i — асимптотические решения, аппроксимирующие \mathbf{f}_i таким образом, что $\mathbf{f}_i = \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\varepsilon}$); $\rho_j(\boldsymbol{\mu}_i, t)$ — базисные функции модели внешних воздействий, $\boldsymbol{\mu}_i$ — соответствующие параметры; $\beta_1 \xi \leq \mathbf{L}_i(\dot{\mathbf{z}}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) \leq \beta_2 \xi$ — соответствующие теоремы, аксиомы и законы модели, определяющие структуру модели и заданные в интервальном виде. Интегральная целевая функция в общем случае выбирается как конечная сумма интегралов базисных решений

$$\sum_{i=1}^N \left(\int_{t_0}^{t_k} z_i dt - \int_{t_0}^{t_k} y_0 dt \right)^2 \quad m_i = \mathbf{G}(\mathbf{p}_i, \mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i, t) \leq \alpha \xi,$$

также могут быть добавлены ограничения на частотную полосу базисных решений. Постановка задачи (8) приводит к решению оптимизационной задачи высокой размерности и сложности, что требует создания и адаптации существующих оптимизационных процедур.

Из всего вышеизложенного следует, что основной проблемой при построении модели систем является выбор класса модели исследуемой системы, предварительная обработка информации об исходной системе (сигналов), в результате которой из данных удаляется шум и определяются характерные черты, которые и представляют интерес при моделировании и следовании исходной системы.

Определение коэффициентов парциальных и эквивалентных жесткостей базового блока интеллектуальных электромеханических систем

Базовые блоки интеллектуальных электромеханических систем являются неотъемлемой частью современных высокоточных систем управления [10–12]. Одной из особенностей подобного рода конструкций с параллельными кинематическими схемами является нестационарность их параметров, например, меняются моменты инерции, массы (присоединенные грузы), коэффициенты жесткости, что важно при управлении подобными конструкциями. Если моменты инерции могут быть рассчитаны на стадии проектирования и загружены в управляющую ЭВМ, то коэффициенты жесткости должны определяться в результате натурных испытаний на стенде. Методика испытаний предусматривает два подхода. Первый — это нахождение эквивалентной жесткости при статическом нагружении по закону Гука, определение деформации конструкции при известном законе нагружения по формуле $\mathbf{F} = \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}$, где \mathbf{F} — известный закон нагружения; \mathbf{C}_{eq} — эквивалентная матрица жесткости; \mathbf{q} — деформации по каждой из координат. Второй подход — это определение жесткостей по собственным частотам системы по формуле $\text{eig}(\mathbf{J}^{-1} \mathbf{C}_{eq}) = \mathbf{\Omega}$, где \mathbf{J} — матрица инерции; $\mathbf{\Omega}$ — спектр системы. Матрица \mathbf{C}_{eq} имеет внедиагональные элементы, и ее значения меняются в зависимости от ориентации элементов базового модуля. Подробно этот вопрос рассмотрен в работе [13]. Воспользуемся готовой формулой [13] для определения эквивалентной жесткости через парциальную, считая, что они одинаковы для каждого исполнительного элемента:

$$\mathbf{C}_{eq} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i^T, \quad \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^T \langle \mathbf{r}_i \rangle \mathbf{c}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{C}}_i = C \frac{\mathbf{c}_b^T \mathbf{r}_i \mathbf{r}_i^T \mathbf{c}_b}{(l_i)^2}, \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ — матрица Эйлера; \mathbf{r}_i — координаты крепления шарниров верхней платформы в системе координат верхней платформы; \mathbf{c} — матрица вращения; \mathbf{C} — парциальная жесткость исполнительного элемента; \mathbf{c}_b — матрица вращения, определяющая начальное положение верхней платформы; l_i — длина i -го исполнительного механизма; \mathbf{r}_i — вектор, определяющий координаты верхних шарниров i -го исполнительного механизма относительно нижних шарниров. Определение жесткости можно свести к нахождению парциальной жесткости исполнительных элементов по формуле

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{C}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q} = C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}, \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{c}_b^T \mathbf{r}_i \mathbf{r}_i^T \mathbf{c}_b}{(l_i)^2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Тогда задача идентификации \mathbf{C} может быть записана как

$$\mathbf{J} = \min_C \{ \Phi \}, \quad C_{\min} \leq C \leq C_{\max},$$

$$\Phi = \sum_{j=1}^N (\mathbf{F}_j - \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}_j)^T (\mathbf{F}_j - \mathbf{C}_{eq} \mathbf{q}_j) = \sum_{j=1}^N \left(\mathbf{F}_j - C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j \right)^T \times \left(\mathbf{F}_j - C \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j \right) = \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \mathbf{F}_j - 2C \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j + C^2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i \mathbf{q}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j, \quad (11)$$

где C_{\min} и C_{\max} — минимальные и максимальные значения парциальной жесткости соответственно; \mathbf{F}_j — j -е измерение упругих сил; \mathbf{q}_j — j -е измерение упругих деформаций. Тогда решением задачи будет аргумент при

$$\Phi = \min_C \left\{ \begin{array}{l} \Phi(C_{\min}), \Phi(C_{\max}), \\ \Phi \left(\frac{\sum_{j=1}^N \mathbf{F}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i \mathbf{q}_j^T \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i^T \mathbf{q}_j} \right) \end{array} \right\}$$

в диапазоне $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$.

При найденной парциальной жесткости исполнительного элемента могут быть рассчитаны эквивалентные жесткости для произвольных положений.

Заключение

В результате проведенного исследования определено, что применение матричного оператора сдвига позволяет в математической, а не в алгоритмической форме описывать разностные фильтры с различной скважностью отсчетов, а также проводить выбор параметров плавающего окна для статистических идентификаторов. Подобный оператор может быть использован для нахождения параметров разностных фильтров при многофункциональном подходе.

В статье дана постановка задачи идентификации с использованием множественно-функционального подхода для нелинейной нестационарной системы с учетом сохранения физической адекватности модели протекающим в ней процессам и реализуемости законов управления.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на решение следующих вопросов:

— создания универсальных алгоритмов сведения предложенных математических постановок задачи идентификации ДО к системам полиномиальных неравенств;

— необходимости разработки эффективных численных методов решения задач идентификации, сформулированных как задачи математического программирования.

Литература

1. **Карабутов Н. Н.** Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур. — М.: Московский государственный индустриальный университет, 2008. — 160 с.
2. **Isermann R., Münchhof M.** Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications. — Springer, 2011. — 705 p.
3. **Mzyk G.** Combined Parametric-Nonparametric Identification of Block-Oriented Systems. — Springer, 2014. — 238 p.
4. **Boutalis Y., Theodoridis D., Kottas T., Christodoulou M. A.** System Identification and Adaptive Control. Theory and Applications of the Neurofuzzy and Fuzzy Cognitive Network Models. — Springer, 2014. — 313 p.
5. **Гроп Д.** Методы идентификации систем. — М.: Мир, 1975. — 302 с.
6. **Первушин В. Ф.** О непараметрической идентификации линейных динамических объектов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 4(25). С. 95–104.
7. **Городецкий А. Е., Тарасова И. Л.** Управление и нейронные сети. — СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2005. — 400 с.
8. **Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А.** Адаптивное управление динамическими объектами. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
9. **Бондарко В. А.** Адаптивное векторное управление асинхронным электродвигателем на основе метода рекуррентных целевых неравенств // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 9. С. 120–135.
10. **Артеменко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю.** Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 2–9.
11. Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System / A. E. Gorodetskiy, V. G. Kurbanov (Eds.). — Springer International Publishing AG, 2017. — 266 p.
12. Smart Electromechanical Systems / A. E. Gorodetskiy (Ed.). — Springer International Publishing Switzerland, 2016. — 277 p.
13. **Кучмин А. Ю.** Моделирование эквивалентной жесткости адаптивных платформ с исполнительными механизмами параллельной структуры // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3. С. 30–39.

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.28

Identification of Non-Stationary Dynamic Objects

Kuchmin A. Yu.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, radiotelescope@yandex.ru

^aInstitute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The current trend in solving identification problems is applying the multiplex functional approach when an identification problem is treated as a large-dimension problem of mathematical programming, making it possible to use standard ways

of solving such problems. **Purpose:** Developing new methods for the identification of linear and nonlinear non-stationary dynamic objects. **Results:** Modifications of OLS-based statistic identifiers have been proposed with the application of a shift operator in the time domain for discrete filters. For the case of a low signal-to-noise ratio, we give a description of the identification process as a system of inequalities on the basis of the multiplex functional approach. When using the interval discrepancy between the identifier output and a real dynamic object, this approach provides the opportunity for a model reduction. For the case of nonlinear systems with the use of multiplex functional approach, we propose a way to set up the identification problem, which is based on the analysis of asymptotic decision types, taking into account physical regularities and restrictions on the parameters and phase coordinates. **Practical relevance:** The obtained results can be used for the synthesis of control systems with identifiers or for building models of non-stationary and nonlinear dynamic systems. The technique of partial stiffness determination can be used for the analysis and synthesis of base blocks for intellectual electromechanical systems.

Keywords — Ordinary Least Squares, Identification, Intellectual Electromechanical Systems.

Citation: Kuchmin A. Yu. Identification of Non-Stationary Dynamic Objects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 28–35 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.28

References

1. Karabutov N. N. *Strukturnaia identifikatsiia sistem: Analiz dinamicheskikh struktur* [Structural Identification of Systems: Analysis of Dynamic Structures]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet Publ., 2008. 160 p. (In Russian).
2. Isermann R., Münchhof M. *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications*. Springer, 2011. 705 p.
3. Mzyk G. *Combined Parametric-Nonparametric Identification of Block-Oriented Systems*. Springer, 2014. 238 p.
4. Boutalis Y., Theodoridis D., Kottas T., Christodoulou M. A. *System Identification and Adaptive Control. Theory and Applications of the Neurofuzzy and Fuzzy Cognitive Network Models*. Springer, 2014. 313 p.
5. Grop D. *Methods of Identification Systems*. Springer-Verlag, 1979. 302 p.
6. Pervushin V. F. On Nonparametric Models of Linear Dynamic Objects. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika* [Bulletin of the Tomsk State University. Management, Computer Facilities and Informatics], 2013, no. 4(25), pp. 95–104 (In Russian).
7. Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L. *Upravlenie i neironnye seti* [Control and Neural Networks]. Saint-Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2005. 400 p. (In Russian).
8. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob'ektami* [Adaptive Control of Dynamic Objects]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 448 p. (In Russian).
9. Bondarko V. A. The Adaptive Vectorial Control by the Asynchronous Electromotor on the Basis of a Method of Recurrent Target Inequalities. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2010, no. 9, pp. 120–135 (In Russian).
10. Artemenko Yu. N., Agapov V. A., Dubarenko V. V., Kuchmin A. Yu. Co-operative Control of Subdish Actuators of Radio-Telescope. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 4, pp. 2–9 (In Russian).
11. *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. A. E. Gorodetskiy, V. G. Kurbanov (Eds.). Springer International Publishing AG, 2017. 266 p.
12. *Smart Electromechanical Systems*. A. E. Gorodetskiy (Ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2016. 277 p.
13. Kuchmin A. Yu. Modeling of Equivalent Stiffness of Adaptive Platforms with Parallel Structure Executive Mechanism. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 3, pp. 30–39 (In Russian).

УДК 621.390

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ

Я. А. Скороходов^а, канд. техн. наук, yaroslavskor@gmail.com

А. М. Андреев^а, канд. техн. наук, доцент, aandreev961@yandex.ru

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Введение: натурные эксперименты с отделяемыми элементами ракет-носителей (последними ступенями), разгонными блоками и космическими аппаратами в целях оценивания потенциальных возможностей приема сигналов автоматической идентификационной системы в космосе дорогостоящи. В ряде случаев для выработки обоснованных решений при проектировании космической системы, а также для планирования применения орбитальной группировки достаточно использовать результаты моделирования. **Цель:** разработка имитационной модели функционирования космической системы автоматической идентификации морских судов. **Результаты:** разработана и программно реализована имитационная модель, позволяющая получать оценки целевых показателей функционирования космических систем идентификации и определения местоположения морских судов с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, а также реального размещения контролируемых объектов в акватории Мирового океана и прибрежных зонах. Варьируя системой ограничений и допущений, с помощью модели можно, с одной стороны, сравнивать результаты моделирования с аналитическими вычислениями, а с другой стороны, получать оценки целевых показателей функционирования космических систем в условиях, максимально приближенных к действительности. Адекватность разработанных моделей и алгоритмов подтверждается экспериментальными исследованиями системы автоматической идентификации морских судов. **Практическая значимость:** представленная модель может быть использована для решения следующих задач: оценивания количественных показателей качества обнаружения судов для заданной структуры орбитальной группировки космических аппаратов, выбора параметров орбитальной группировки космических аппаратов для заданных показателей обнаружения морских судов, оценивания энергетической доступности сигналов для различных параметров орбитального движения космического аппарата и других условий.

Ключевые слова — автоматическая идентификационная система, обработка информации, имитационное моделирование, космические аппараты.

Цитирование: Скороходов Я. А., Андреев А. М. Моделирование функционирования космического сегмента системы автоматической идентификации морских судов// Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 36–48. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Citation: Skorokhodov Ya. A., Andreev A. M. Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification System. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Введение

В настоящее время актуальным и востребованным является создание спутниковой автоматической идентификационной системы (АИС), позволяющей обеспечить глобальность и непрерывность мониторинга движения морских судов [1–3]. Это связано с постоянным увеличением морского трафика и ужесточением требований безопасности движения кораблей, а также необходимостью противодействовать терроризму. За последние 10 лет проведено более 40 натурных экспериментов с использованием отделяемых элементов ракет-носителей (ступеней и разгонных блоков) и космических аппаратов (КА) в целях оценивания потенциальных возможностей приема сигналов АИС в космосе [4, 5].

В наши дни создаются и постепенно наращиваются орбитальные группировки КА с возможностью приема, обработки и ретрансляции сигналов АИС, которые внедряются в систему обеспе-

чения безопасности движения морских судов и становятся ее неотъемлемой частью. Самый большой задел в этой области принадлежит компании Iridium Communications Inc. (США), имеющей на данный момент орбитальную группировку из 50 КА Iridium NEXT (планируется всего 75 КА). В России в 2014 г. был запущен КА «Ресурс-П» № 2, на борту которого в качестве дополнительной нагрузки установлен радиокомплекс, предназначенный для приема радиосигналов с морских судов и автоматической идентификации последних. Полученные с его помощью экспериментальные данные были детально проанализированы [1, 5].

Натурные исследования с использованием экспериментальных КА или средств выведения являются дорогостоящей операцией. Порой для выработки обоснованных решений, а также планирования применения орбитальной группировки в будущем достаточно результатов математического моделирования. В работе пред-

ставлена имитационная модель функционирования космической системы (КС) контроля движения морских судов (модель надводной радиоэлектронной обстановки включает свыше 500 тыс. морских судов — источников сообщений АИС).

Имитационная модель функционирования КС автоматической идентификации морских судов

В обобщенном виде состав и элементы модели функционирования КС автоматической идентификации морских судов представлены на рис. 1.

Модель надводной радиоэлектронной обстановки (распределения источников излучений АИС) представлена множеством элементов $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N$, каждый из которых соответствует источнику излучения и характеризуется его местоположением C_i на земной поверхности. Модель является статической, т. е. местоположения объектов наблюдения за время моделирования не изменяются. Предлагаются два способа к размещению источников излучений: в первом случае координаты C_i местоположений объектов наблю-

дения определяются статистически по заданному закону распределения, как правило, равномерному; во втором случае используется «снимок» реального местоположения объектов для заданного момента времени, который может быть получен с веб-сервисов слежения за передвижением морских судов, таких как MarineTraffic или VesselFinder [6, 7].

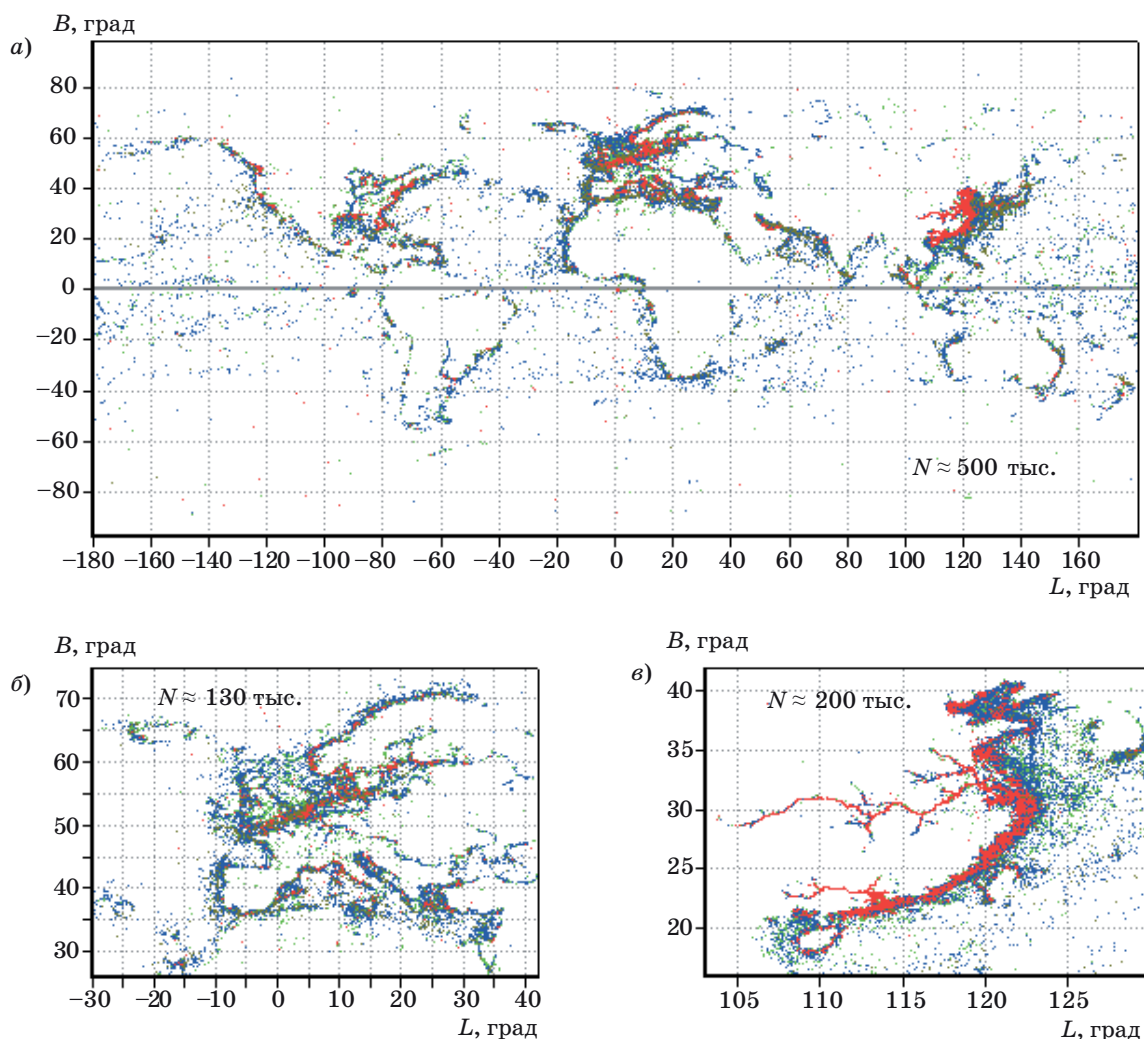
Выбор способа размещения источников излучений определяется прежде всего целью моделирования. Первый способ может применяться для сравнения результатов имитационного моделирования с результатами аналитических вычислений, предложенных другими авторами, а также анализа энергетической доступности сигналов [8], второй способ — для получения обоснованных результатов применения КС с учетом неоднородности распределения судов на земной поверхности и других факторов.

Расположение судов, оснащенных транспондерами АИС классов А и В на карте земной поверхности в целом, а также отдельно в регионах, характеризующихся наибольшей плотностью размещения судов, схематически представлено на рис. 2, а–в. Использована следующая цветовая схема: красным цветом обозначены суда со



■ **Рис. 1.** Модель функционирования системы автоматической идентификации морских судов

■ **Fig. 1.** The vessels automatic identification functioning system model



■ **Рис. 2.** Распределение источников излучений АИС: *а* — земная поверхность в целом; *б* — регионы Средиземного и Северного морей; *в* — Южно-Китайское море
 ■ **Fig. 2.** AIS radiation sources distribution: *a* — earth’s surface as a whole; *b* — Mediterranean and North Seas regions; *c* — South China Sea

скоростью передвижения $v > 23$ уз; желтым — $v \in (14;23]$ уз; синим — $v \in (3;14]$ уз; зеленым — $v < 3$ уз. Данные о местоположении судов, их скорости, курсе передвижения и массо-габаритных характеристиках получены с веб-сервера MarineTraffic [6] в период с 13.05.2017 г. по 17.05.2017 г.

Модель распределенных систем пунктов приема сообщений включает модель орбитальной группировки (ОГ) КА и модель сети наземных пунктов контроля движения морских судов. Модель ОГ КА представлена множеством элементов $r_j \in R, j = 1, \dots, N_R$, структура ОГ задается следующими параметрами: количеством плоскостей n , параметрами орбит в каждой плоскости (долготой восходящего узла Ω , наклонением i , апогеем r_a , перигеем r_p , широтой перицентра ω), количеством КА в каждой плоскости, углами, на

которые разнесены КА друг относительно друга в одной плоскости.

Модель сети наземных пунктов контроля движения морских судов представлена множеством элементов $q_k \in Q, k = 1, \dots, N_Q$, каждый из которых характеризуется своим местоположением C_j на земной поверхности. Моделирование функционирования распределенной сетевой системы наземных пунктов является отдельной научно-технической задачей и в данной работе не рассматривается. В представленных базах данных КА и наземных пунктов содержится актуальная информация о характеристиках бортовых и наземных средств приема и передачи сигналов АИС.

Модель орбитального движения, относящаяся к баллистическим, задана отображением $\eta: C_j(t_k) \rightarrow C_j(t_{k+1})$, где $C_j(t_k), C_j(t_{k+1})$ — положение КА r_j в моменты t_k и t_{k+1} соответственно. Модель яв-

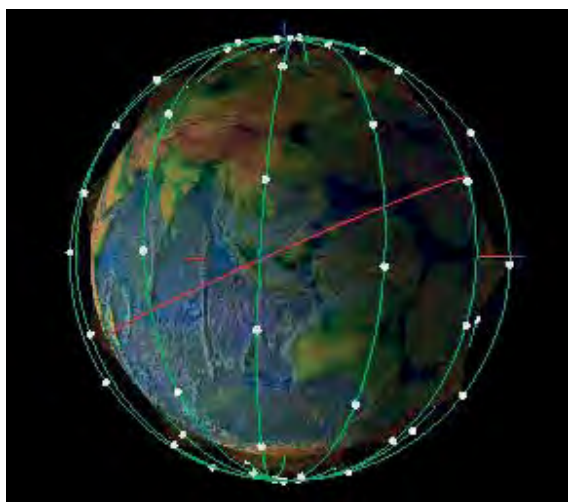
ляется динамической. Методы расчета орбитального движения КА являются общеизвестными и приведены, например, в работах [9, 10]. Для проверки корректности работы моделей ОГ КА и орбитального движения в разработанном программном комплексе имитационного моделирования реализован компонент трехмерной визуализации функционирования КС. Визуальное представление функционирования КС на примере ОГ КА Iridium NEXT изображено на рис. 3. В рассматриваемой ОГ 75 КА расположены в шести плоскостях по 11 в каждой и девять КА являются резервными. Модель Земли задается общим земным эллипсоидом с основными геометрическими параметрами: большая полуось $a = 6378,136$ км, коэффициент сжатия $\alpha = 1/298,258$.

Модель канала передачи информации учитывает расстояние $d(s_i, r_j) = d_{ij}$ от источника излучения s_i до радиоприемного устройства r_j , временные задержки Δt на распространение сигналов, ослабление мощности $L_1(d_{ij}, f)$ сигналов при их распространении в свободном пространстве, потери $L_2(\varphi)$ из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, эффект Доплера, диаграмму направленности передающей антенны и вероятность безошибочного приема сообщений.

Мощность E принятого сигнала радиоприемным устройством КА рассчитывается с использованием выражения

$$E = e + L_1(d_{ij}, f) + L_2(\varphi) + G,$$

где e — мощность излучения; G — коэффициент направленного действия.



■ **Рис. 3.** Трехмерная визуализация ОГ КА Iridium NEXT

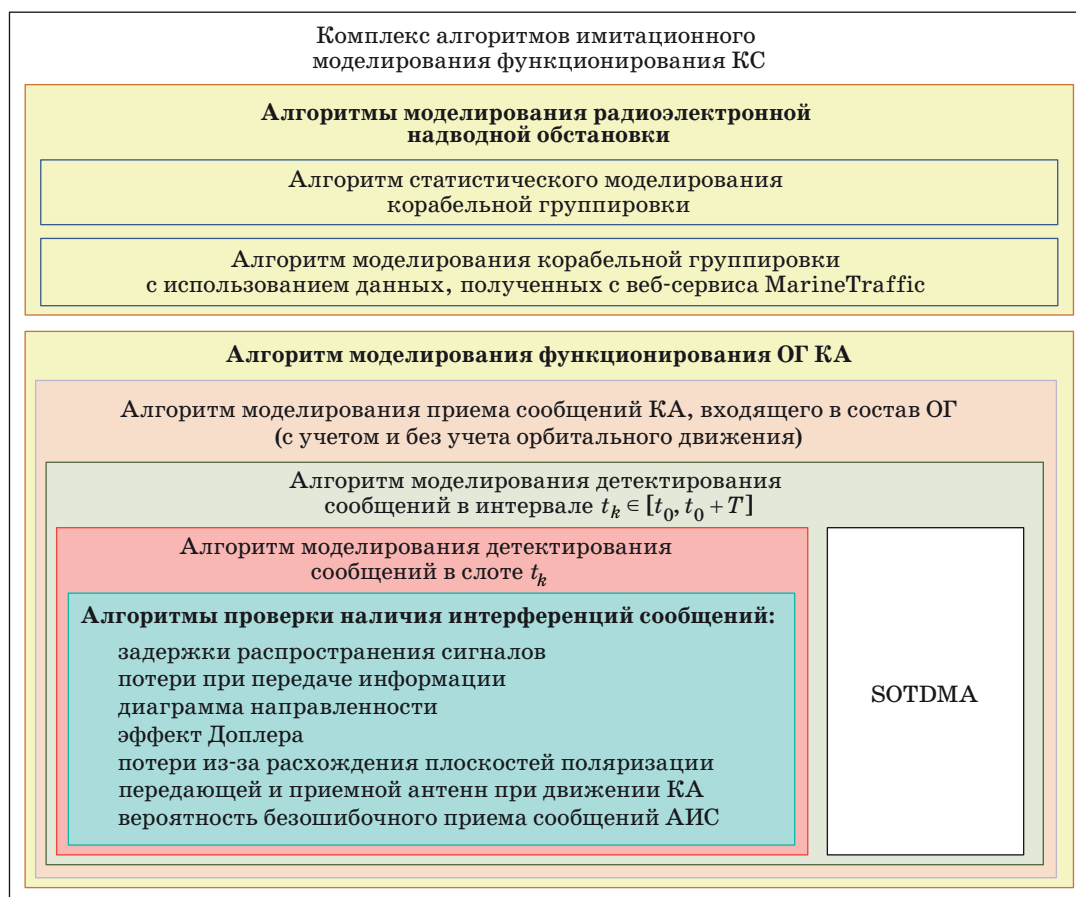
■ **Fig. 3.** The satellites Iridium NEXT constellation three-dimensional visualization

В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи [11] мощность сигнала для транспондеров класса А составляет 12 Вт (40,7 дБм), класса В — 2,5 Вт (34,0 дБм). Коэффициент направленного действия задается отображением $\mu: b \rightarrow G$, представляющим собой диаграмму направленности антенны АИС. Угол b возвышения КА над горизонтом определяется на каждом шаге моделирования и соответствует углу места КА в топоцентрической пунктовой системе координат $X_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$, начало которой совпадает с центром размещения корабля — источника сообщений АИС s_i на поверхности земного эллипсоида, определяемой геодезической широтой B_i и долготой L_i . Ось X_{Π} направлена в сторону Северного полюса Земли по касательной к меридиану корабля s_i ; ось Y_{Π} — по внешней нормали к земному эллипсоиду, а ось Z_{Π} дополняет систему до правой [12].

Модель распределения сигналов реализуется специальным алгоритмом планирования взаимодействия слотов для передачи сообщений каждой станцией SOTDMA (Self-Organized Time-Division Multiple Acces), исключающим по возможности коллизии сообщений, т. е. прием двух и более сообщений в одном слоте в районе прямой видимости морских судов [1, 13]. Считается, что доступ к каналу передачи информации осуществляется только с помощью алгоритма SOTDMA, т. е. суда работают в автономном (непрерывном) режиме, при этом фаза первого кадра длительностью одна минута завершена, а суда не меняют скорость и курс передвижения в течение интервала наблюдения.

Модель функционирования КС контроля движения морских судов реализована в виде комплекса алгоритмов, взаимосвязь которых схематически изображена на рис. 4. Разработанный комплекс алгоритмов позволяет задавать различные ограничения и допущения (задержки распространения сигналов, потери при передаче информации, диаграмму направленности, эффект Доплера, расхождение плоскостей поляризации передающей и приемной антенн, вероятность безошибочного приема сообщения) и получать оценки целевых показателей функционирования КС в условиях, максимально приближенных к действительности.

Разработанный комплекс алгоритмов программно реализован. Исходными данными для моделирования являются время t_0 начала и интервал T моделирования, координаты морских судов в сферической геодезической системе координат, количество КА в ОГ и параметры их орбит, местоположение, скорость и курс передвижения морских судов — источников излучений сигналов АИС. Перед началом моделирования каждому из морских судов назначается множество сло-



■ **Рис. 4.** Комплекс алгоритмов имитационного моделирования функционирования КС
 ■ **Fig. 4.** Algorithms complex for space system functioning simulation

тов $T_i = \{t_1, \dots, t_{n_i}\}$, $n_i = \text{card}\langle T_i \rangle$ передачи сообщений исходя из их динамических характеристик (скорости и курса передвижения) [11].

В процессе работы программного комплекса для каждого тайм-слота $t_i \in [t_0, t_0 + T]$ выполняется следующая последовательность шагов:

1) рассчитывается текущее положение КА $r_j \in R$, $j = 1, \dots, M$, входящих в состав ОГ, по заданным начальным значениям оскулирующих элементов орбиты;

2) для КА $r_j \in R$, $j = 1, \dots, N_R$ определяется энергетическая доступность $v_r(s_i, r_j)$ источников излучений $s_i \in S$, $i = 1, \dots, N$ исходя из условий превышения минимально допустимого угла места $b(s_i, r_j)$ КА r_j в топоцентрической системе координат, связанной с местоположением анализируемого источника излучений s_i , и требуемого потока мощности сигналов АИС на входе приемника r_j с учетом потерь передачи в свободном пространстве, диаграммы направленности типовой судовой антенны АИС, потерь из-за расхождения плоскостей поляризации передающей и приемной антенны;

3) для всех объектов наблюдения $s_i | v_r(s_i, r_j) = 1$, находящихся в зоне покрытия КА r_j , проверяется

условие задействования анализируемого тайм-слота t_k для передачи сигнала и наличия коллизии с сообщениями других судов $s_k \in S$, $s_i \neq s_k$, с учетом задержки распространения сигналов от различных источников. Вычисляется вероятность безошибочного приема однослотового сообщения АИС, состоящего из 256 бит, с частотной модуляцией для отношения сигнал/шум, где энергия шума при наличии интерференции сигналов соответствует максимальной энергии одного из «мешающих» сообщений.

В случае больших объемов данных (при количестве источников излучений, составляющих надводную радиоэлектронную обстановку, свыше 500 тыс.), моделирование для ОГ, состоящих из 15 и более КА, может занимать достаточно продолжительное время, несмотря на распараллеливание вычислений для каждого КА отдельно с учетом ресурсов процессора (количества ядер). По этой причине в дальнейшем планируется разработать алгоритмы моделирования с использованием технологии массово-параллельных вычислений.

Результатом работы комплекса алгоритмов являются целевые показатели функционирова-

ния системы контроля движения морских судов, к которым следует отнести:

- количество $v_r(S, t)$ доступных (с энергетической точки зрения) судов от текущего положения одного или нескольких КА $r_j \in R, j = 1, \dots, M$ на орбите с заданными параметрами [8];

- зависимость количества $n_1(t, S)$ переданных сообщений от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_1(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

- зависимость количества $n_2(t, S)$ безошибочно принятых сообщений от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_2(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

- зависимость количества $n_3(t, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение о своем местоположении, от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_3(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

- зависимость количества $n_4(t, S)$ обнаруженных судов от времени моделирования t , а также зависимость количества $n_4(t, l, S)$ от времени t и текущего витка l (или другого заданного интервала времени);

- среднее количество $N_1(T, S)$ переданных сообщений за интервал моделирования T ;

- среднее количество $N_2(T, S)$ безошибочно принятых сообщений за интервал моделирования T ;

- среднее количество $N_3(T, S)$ судов, передавших хотя бы одно сообщение о своем местоположении, за интервал моделирования T ;

- среднее количество $N_4(T, S)$ обнаруженных судов за интервал моделирования T ;

- среднее количество $N_4(T, S)$ обнаруженных судов в зависимости от региона наблюдения за интервал моделирования T .

Результаты имитационного моделирования функционирования КС автоматической идентификации морских судов

В целях анализа энергетической доступности сигналов АИС (оценивания количества $v_r(S, t)$ наблюдаемых судов от текущего положения одного или нескольких КА $r_j \in R, j = 1, \dots, M$ на орбите с заданными параметрами) предлагается два сценария проведения моделирования. В первом случае используется статическая модель функционирования КС (без учета орбитального движения) и предполагается равномерное распределение морских судов в зоне обзора КА, что позволит оценить экстремальные (минимальное и максимальное) значения мощности сигнала на входе

детектора при различных значениях мощности передатчика и запас по мощности с учетом различных значений чувствительности радиоприемного устройства. Во втором случае используется модель КА с учетом орбитального движения и реальной надводной радиоэлектронной обстановки, что дает возможность получить зависимость количества доступных (с энергетической точки зрения) судов от региона наблюдения.

С учетом сказанного моделировались следующие сценарии.

1. Морские суда распределены равномерно в зоне обзора КА на земной поверхности. Модель Земли — ОЗЭ-1990 (большая полуось $a = 6378,136$ км, коэффициент сжатия $\alpha = 1/298,258$).

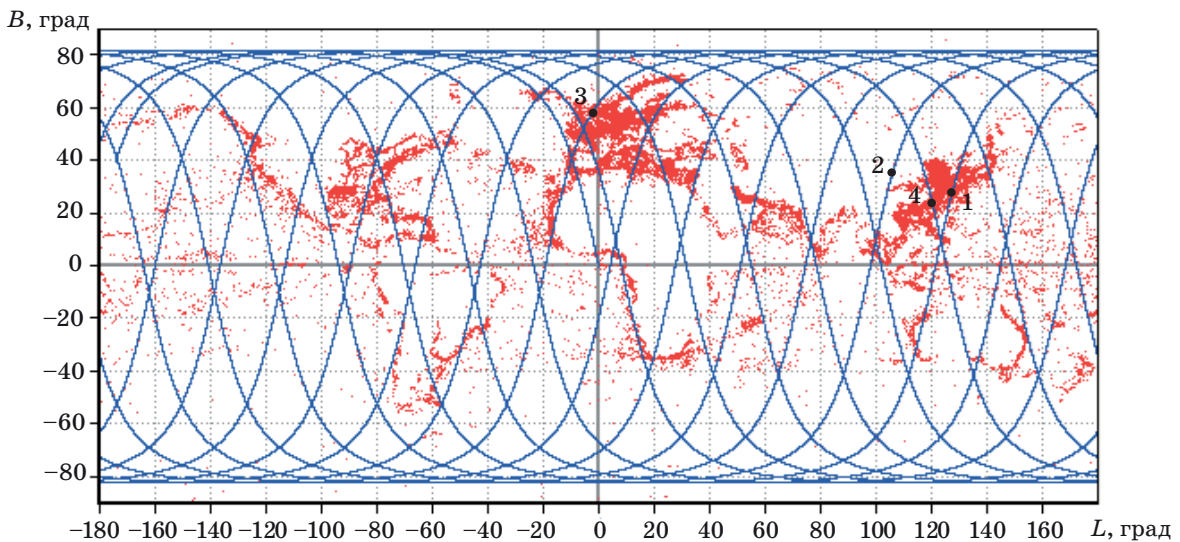
Статистические характеристики энергетических параметров сигналов системы АИС для КА на круговой орбите с высотой $h = 450$ км представлены в таблице (в графе «Запас по мощности» через черту указаны значения для приемников с чувствительностями -118 и -107 дБм соответственно). Значения получены путем статистического анализа энергетических характеристик сигналов, переданных объектами, равномерно распределенными в зоне обзора КА. Из анализа таблицы видно, что на границе зоны видимости КА сигналы являются доступными для приемника с чувствительностью -118 дБм, в то время как для приемника с чувствительностью -107 дБм даже при мощности переданного сигнала, равной $40,7$ дБм, запас составляет всего $5,2$ дБм, что соответствует вероятности безошибочного приема сообщения АИС для некогерентного демодулятора, близкой к нулю. При значении угла возвышения над горизонтом свыше 70 град сигналы являются энергетически недоступными для приемника с чувствительностью как -107 дБм, так и -118 дБм. В лучшем случае (взаимном расположении источника и приемника сигналов) для радиоприемного устройства с чувствительностью -118 дБм имеется гарантированный запас мощности для любого класса передающих устройств, для приемников с чувствительностью -107 дБм сигналы являются практически недоступными для передатчиков мощностью 34 дБм, — запас составляет всего $3,7$ дБм, что соответствует низкой вероятности безошибочного приема сообщений.

2. Моделирование движения КА — приемника сигналов АИС с параметрами орбиты: долгота восходящего узла $\Omega = 0$ град; наклонение $i = 98$ град; апогей $r_a = 450$ км; перигей $r_{II} = 450$ км; широта перицентра $\omega = 0$ град. Интервал моделирования составляет сутки ($86\,400$ с), время t_0 начала моделирования соответствует положению КА на орбите с истинной аномалией $\theta_0 = 0$ град.

Точками на рис. 5, где изображены местоположения объектов наблюдения — источников сообщений АИС и трасса полета КА с заданными

- Статистические характеристики энергетических параметров сигналов АИС для КА на круговой орбите с высотой $h = 450$ км
- AIS signals energy parameters statistical characteristics for satellite in a circular orbit with a height $h = 450$ km

| Характеристика | Граница зоны видимости | Максимум суммарных потерь | Минимум суммарных потерь | Средние суммарные потери | |
|---|------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| Суммарные потери, дБм | -142,495 | -149,833 | -137,312 | -139,999 | |
| Расстояние $d(s_i, r_j)$ от источника s_i до приемника r_j , км | 2406,520 | 481,738 | 787,129 | 1570,680 | |
| Потери мощности на распространение $L_1(d_{ij}, f)$, дБ | -144,218 | -130,247 | -134,457 | -140,458 | |
| Угол возвышения над горизонтом, град | 0,357 | 68,401 | 31,945 | 9,901 | |
| Коэффициент усиления антенны, дБи | 2,000 | -19,583 | -2,813 | 0,688 | |
| Угол между плоскостями поляризаций приемной и передающей антенн $\varphi(s_i, r_j)$, град | 20,653 | 1,484 | 5,622 | 13,110 | |
| Потери из-за расхождения плоскостей поляризации приемной и передающей антенн $L_2(\varphi_{ij})$, дБ | -0,577 | -0,00292 | -0,0419 | -0,229 | |
| Запас по мощности, дБм | 34,0 | 9,495 / -1,495 | 2,167 / -8,833 | 14,688 / 3,688 | 12,001 / 1,001 |
| | 40,7 | 16,205 / 5,205 | 8,867 / -2,133 | 21,388 / 10,388 | 18,701 / 7,701 |

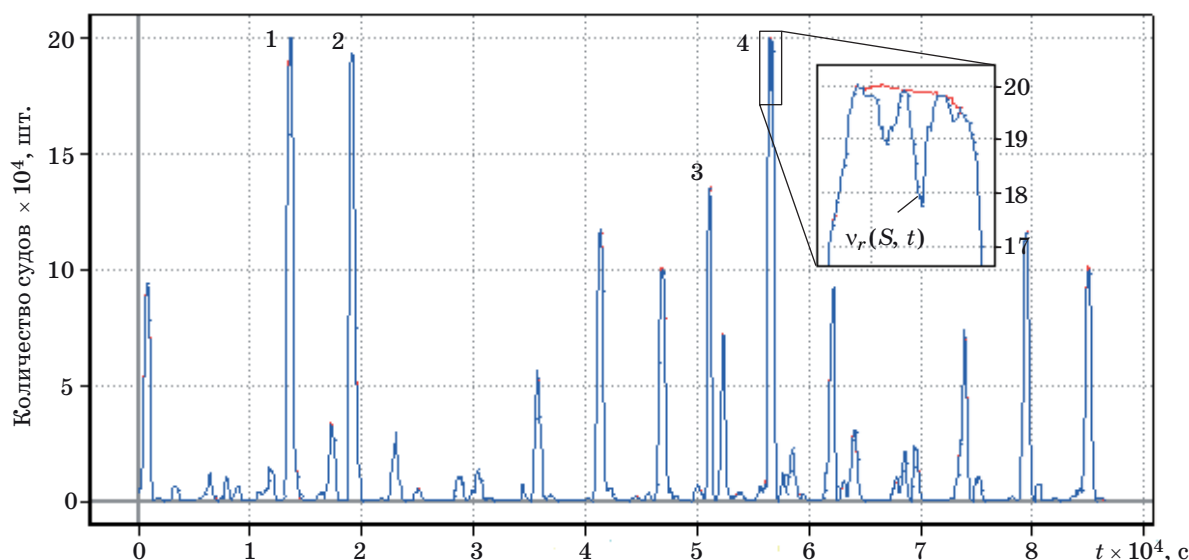


■ **Рис. 5.** Распределение источников излучений АИС на земной поверхности и трасса полета КА
 ■ **Fig. 5.** The AIS signals emission sources distribution on the Earth and satellite trace

параметрами, обозначены положения КА, в которых наблюдается наибольшее количество видимых (с энергетической точки зрения) морских судов.

На рис. 6 представлены графики количества судов $v(S, t)$, находящихся в зоне обзора КА r_k , и количества судов $v_r(S, t)$, находящихся в зоне

обзора КА, с учетом их энергетической доступности, где S — множество анализируемых судов $s_i \in S, i = 1, \dots, N, t$ — момент моделирования $t \in [t_0, t_0 + T]$. Цифры 1–4 на рис. 5 и 6 являются взаимно однозначными. Отсутствие радиовидимости судов обусловлено направленными свойствами передающих антенн АИС. Так как диа-



■ **Рис. 6.** Количество судов $v(S, t)$, попавших в зону обзора КА, и судов $v_r(S, t)$ в зоне обзора с учетом энергетической доступности

■ **Fig. 6.** The number of ships $v(S, t)$ in the satellite view area, and ships $v_r(S, t)$ in the view area, taking into account the energy availability

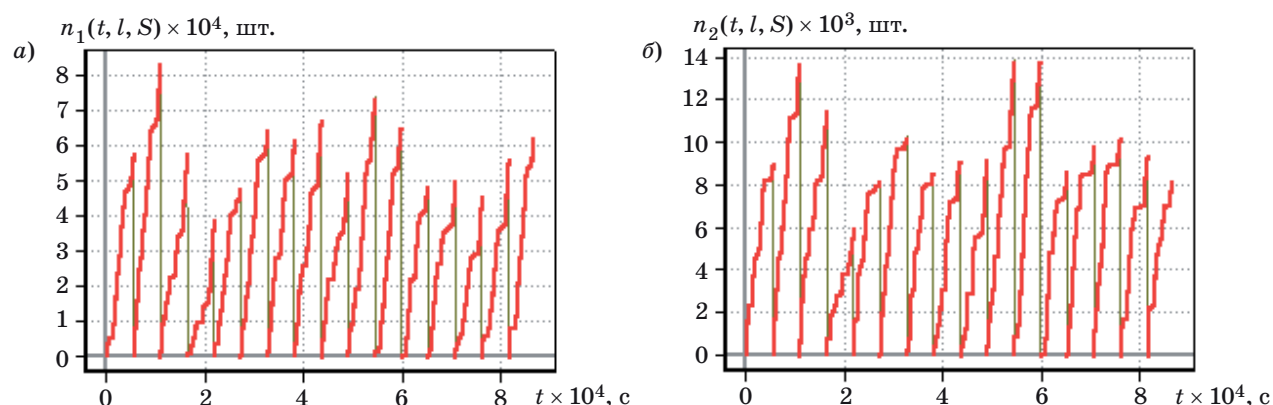
грамма направленности типовой антенны АИС представляет собой тор, сигналы, излучаемые кораблями, для которых КА находится в зените или близко к этой точке, ослабляются ниже заданного порогового значения мощности приема. Анализ зависимости, приведенной на рис. 6, показывает, что коэффициент энергетической доступности не принимает значения менее 80 %. При проведении моделирования пороговое значение ослабления по мощности сигналов принималось равным -108 дБм, что соответствует вероятности ошибки приема однослотового сообщения АИС, состоящего из 256 бит, равной 20 % (при этом чувствительность радиоприемного устройства равна -118 дБм). Данное значение рекомендовано Международной комиссией по электросвязи [14, 15].

Следует отметить, что максимальное количество $v_r(S, t)$ радиовидимых судов сильно колеблется в зависимости от региона, наблюдаемого КА. Регионами с наибольшим количеством радиовидимых судов являются районы Северного и Средиземного морей и район Южно-Китайского моря, при этом значение $v_r(S, t)$ достигает 120 тыс. и 199 тыс. кораблей соответственно. Это достаточно большое количество, и, учитывая загруженность канала сообщениями, требуются схемно-технические решения (например, пространственно-разнесенного приема), чтобы снизить вероятность интерференций сообщений. Результаты моделирования в виде графиков зависимостей количества $n_1(t, l, S)$ безошибочно принятых сообщений и количества $n_2(t, l, S)$ обнаруженных судов от времени моделирования t и

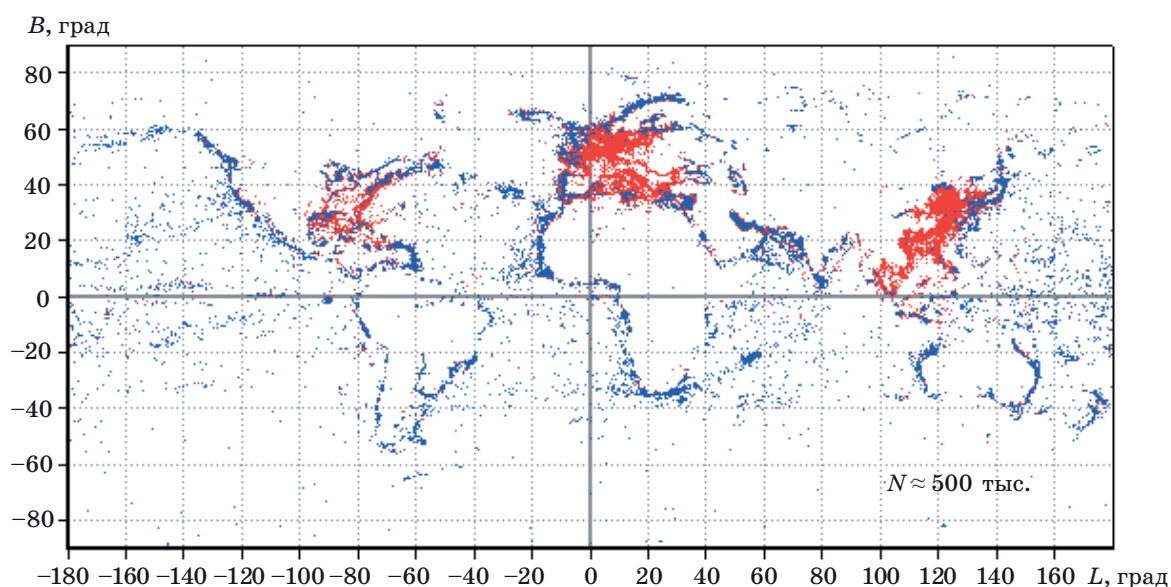
текущего витка $l = 1, \dots, 15$ для КА на круговой орбите с высотой $h = 300$ км (высота орбиты снижена для уменьшения вероятности коллизии сообщений) представлены на рис. 7, а и б.

Минимальное значение количества безошибочно принятых сообщений составляет 38 540 ($l = 4$), максимальное — 83 247 ($l = 2$), среднее — 57 634, минимальное количество обнаруженных судов за один виток составляет 5963 ($l = 4$), максимальное — 13 776 ($l = 10$), среднее — 10 021 шт. Общее количество детектированных сообщений за время моделирования ($T = 86\,400$ с) составляет $N_1(T, S) = 926\,458$, общее количество обнаруженных судов $N_2(T, S) = 65\,812$. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в открытых источниках информации, в том числе в работе [1]. Схема расположения обнаруженных (синие) и не обнаруженных (красные) судов представлена на рис. 8. Анализ полученных результатов позволяет определить зависимость среднего количества обнаруженных судов от региона и времени наблюдения T . Очевидно, что наиболее трудными с точки зрения обнаружения корабельных группировок, как и ожидалось, являются регионы Средиземного и Северного морей и регион Южно-Китайского моря. На рисунке видно, что имеются «слепые» зоны из-за высокой загруженности канала передачи информации и интерференции сообщений.

С использованием полученных оценок целевых показателей возможно обосновать ряд схемно-технических решений, например, задаваясь местоположением наземных пунктов приема и



■ **Рис. 7.** Результаты моделирования для КА на круговой орбите с высотой $h = 300$ км: *а* — количество $n_1(t, l, S)$ принятых сообщений; *б* — количество $n_2(t, l, S)$ обнаруженных судов
 ■ **Fig. 7.** The simulation results for a satellite in a circular orbit with a height $h = 300$ км: *a* — the received messages number $n_1(t, l, S)$; *б* — the detected ships number $n_2(t, l, S)$



■ **Рис. 8.** Визуализация местоположений обнаруженных морских судов на земной поверхности
 ■ **Fig. 8.** Detected vessels locations on the Earth's surface visualization

обработки информации, определить требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации.

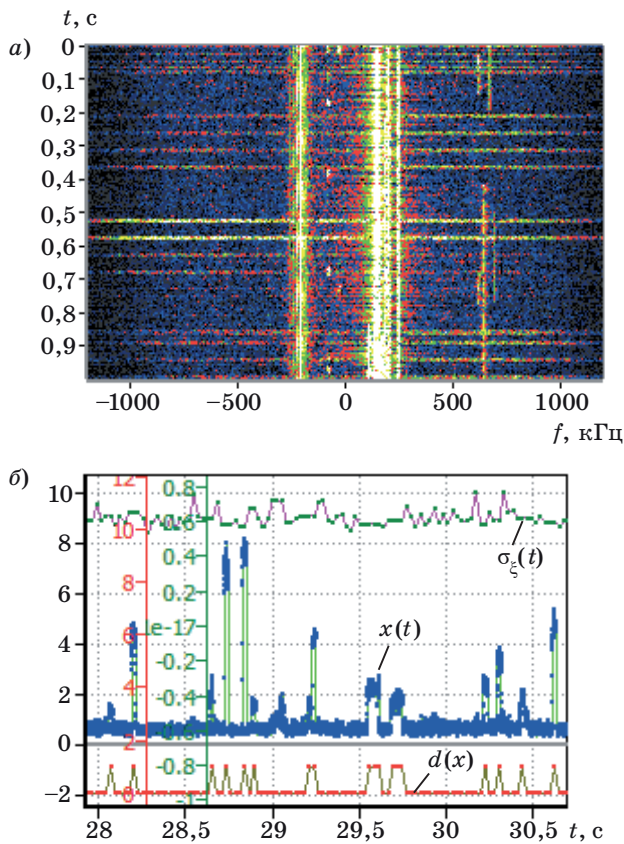
Экспериментальные исследования и верификация имитационной модели функционирования системы автоматической идентификации морских судов

Адекватность разработанной имитационной модели подтверждается статистически незначительным отличием полученных с использованием имитационного моделирования оценок среднего количества обнаруженных объектов наблюдения

с результатами аналитических выражений, предложенных другими авторами [14, 16, 17]. Также в целях верификации предлагаемой модели проводился натурный эксперимент с использованием авиационного макета бортовой специальной аппаратуры приема и обработки сигналов АИС.

Эксперимент проводился в три этапа. Первый этап включал проверку работоспособности всех составных частей макета и оценивание технических характеристик радиоприемного устройства. На втором этапе проводилась запись радиосигналов на стационарных наземных пунктах и на летно-подъемном средстве в различных режимах и конфигурациях макета. Обработка полученных экспериментальных данных и анализ результатов составляли суть третьего этапа.

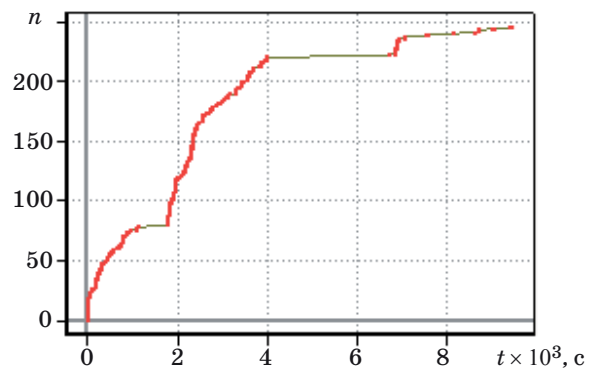
Результаты обработки оцифрованного радиосигнала с использованием созданного специального программно-математического обеспечения представлены на рис. 9. На рис. 9, а изображена частотно-временная развертка сигнала, записанного на летно-подъемном средстве в районе Финского залива, с центральной частотой $f_0 = 162,050$ МГц и шириной полосы $\omega = 2,4$ МГц длительностью 1 с и шириной окна дискретного преобразования Фурье 0,42(6) мс (1024 отчета), анализ которой позволяет выделить помехи как распределенные по всей полосе частот (белый шум), так и сконцентрированные на определенных частотах (паразитные излучения бортовой аппаратуры летно-подъемного средства и излучение обзорных радиолокаторов аэродрома), что в целом говорит о сложной сигнально-шумовой обстановке. На частотах, смещенных относительно центральной частоты f_0 на -25 и -75 кГц, также отчетливо видны сигналы АИС. Определение количества переданных сигналов АИС выполнялось с использованием «плавающего» порогового значения отношения сигнал/шум на анализируемом интервале времени, адаптирующегося к текущему уровню энергии $\sigma(t)$ шу-



■ **Рис. 9.** Анализ оцифрованного радиочастотного сигнала: а — частотно-временная развертка; б — энергетический обнаружитель
 ■ **Fig. 9.** Digitized radio frequency signal analysis: а — time-frequency scan; б — energy detector

ма. На рис. 9, б изображены амплитуда отфильтрованного сигнала на частоте $f_1 = 161,975$ МГц и шириной $\omega = 9,6$ кГц, график текущего значения энергии $\sigma(t)$ шума и решающая функция $d(x)$, принимающая значение 1, если в слоте есть сигнал, иначе 0.

Количество безошибочно принятых сообщений оценивалось по результатам работы программно реализованного демодулятора GMSK и декодера АИС сообщений. Определены зависимости числа декодированных сообщений от значения коэффициента усиления малошумящего усилителя при различных конфигурациях макета бортовой специальной аппаратуры в наземных и летных условиях его эксплуатации. Экспериментально полученная зависимость количества n обнаруженных судов от времени t наблюдения изображены на рис. 10. Разрывы на графике обусловлены переключениями режимов работы аппаратуры, а также перерывами между полетами. Общая продолжительность наблюдения составляет около 90 мин. Значения количества переданных сообщений АИС, полученные с использованием имитационной модели, статистически незначимо отличаются от значений соответствующих характеристик в условиях реальной надводной обстановки. В то же время количество безошибочно принятых сообщений существенно отличается от соответствующей характеристики, полученной в результате моделирования. Это обусловлено неидеальностью демодулятора (в моделировании принимается идеальная зависимость вероятности безошибочного приема сообщений от уровня сигнал/шум для некогерентного демодулятора), сложной шумовой обстановкой в зоне аэродрома и электромагнитным излучением бортовой аппаратуры летно-подъемного средства. Перечисленные факторы снижают вероятность безошибочного приема сообщений.



■ **Рис. 10.** Зависимость количества обнаруженных объектов от времени наблюдения
 ■ **Fig. 10.** Detected objects number dependence on the observation time

В целом результаты эксперимента подтверждают адекватность модели и возможность ее применения для расчета показателей функционирования систем автоматической идентификации морских судов.

Заключение

Отличительной особенностью представленной имитационной модели спутниковой автоматической идентификационной системы является возможность задавать различные ограничения и допущения (модель распределения источников излучений, модель планирования задействования слотов для передачи сообщений, модель канала распространения сигналов), что, с одной стороны, позволяет сравнивать результаты моделирования с оценками, полученными другими авторами, в том числе и с помощью аналитических выражений, а с другой стороны, получать оценки целевых показателей функционирования КС в условиях, максимально приближенных к действительности.

Имитационная модель функционирования КС может быть использована для решения следующих задач:

— оценивания энергетической доступности сигналов для различных вариантов структур ОГ

КА и других условий (с учетом различных допущений и ограничений при моделировании);

— оценивания количественных показателей обнаружения судов для заданной структуры ОГ КА;

— выбора параметров ОГ КА для заданных показателей обнаружения морских судов;

— подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов космической техники, в частности, задаваясь местоположением наземных пунктов приема и обработки информации, можно определить требования к объему бортового запоминающего устройства и скорости передачи информации.

Корректность работы предложенных алгоритмов моделирования функционирования КС автоматической идентификации морских судов подтверждается проверкой статистических гипотез о равенстве полученных экспериментальных значений количества переданных сообщений судами в заданном территориальном районе, количества безошибочно принятых сообщений, количества обнаруженных объектов за заданный интервал времени и результатов имитационного моделирования, что позволяет говорить об успешном решении поставленной задачи.

Литература

1. Кузнецов А. М., Романов А. А., Романов А. А. Моделирование приема коллизий сигналов АИС на борту КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 25–36.
2. Chen Y. Detection Probability Analysis of Space-Based Ais Signal by Using Geometrical Model // Journal of Shipping and Ocean Engineering. 2014. Vol. 4. P. 161–171.
3. Høyе G., Eriksen T., Meland B.J., Narheim G. Space-Based Ais for Global Maritime Traffic Monitoring // Acta Astronautica. 2008. Vol. 62. P. 240–245.
4. Trong T. V., Dinh Q. T., Van T. D., Quang H. P., Nguyen H. Constellation of Small Quick-Launched and Self-Deorbiting Nano-Satellites with AIS Receivers for Global Ship Traffic Monitoring // Proc. 2nd Nano-Satellite Symp., Tokyo, Japan, March 2011. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:424564/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
5. Романов А. А., Романов А. А., Тюлин А. Е. Мало-размерные космические аппараты мониторинга подвижных объектов ОАО «Российские космические системы»: состояние и перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 3–10.
6. Marine Traffic. Визуализация местоположений морских судов в реальном времени на карте земной поверхности. <https://www.marinetraffic.com/ru> (дата обращения: 05.11.2016).
7. VesselFinder. Визуализация местоположений морских судов в реальном времени на карте земной поверхности. <https://www.vesselfinder.com> (дата обращения: 05.11.2016).
8. Скороходов Я. А., Малышев Д. В. Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования // Информация и космос. 2017. № 4. С. 143–147.
9. Нариманов Г. С. Основы теории полета космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1972. — 608 с.
10. Суханов А. А. Астродинамика. — М.: Ин-т космических исследований РАН, 2010. — 201 с.
11. Технические характеристики системы автоматической идентификации, использующей многостанционный доступ с временным уплотнением каналов в полосе ОБЧ морской подвижной службы. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 10.09.2016).
12. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 669 с.
13. Menghui Y., Yongzhong Z., Li F. Collision and Detection Performance with Three Overlap Signal Colli-

- sions // Space-Based AIS Reception: Proc. of 11th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, Liverpool, United Kingdom, Jun. 25–27, 2012. P. 1641–1648.
14. REPORT ITU-R M.2084. Satellite Detection of Automatic Identification System Messages. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2084> (дата обращения: 05.09.2016).
15. REPORT ITU-R M.2169. Improved Satellite Detection of AIS. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2169-2009-PDF-E.pdf (дата обращения: 05.09.2016).
16. Mendes S., Amado S., Teresa V., Scorzolini A., Perini V., Sorbo A. Satellite AIS — an End-to-End Simulation Approach // Proc. 11th Intern. WS on Simulation & EGSE Facilities for Space Programmes, Noordwijk, Netherlands, Sept. 28–30, 2010. <https://indico.esa.int/indico/event/109/session/15/contribution/48/material/0/0.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).
17. Chen Y. Research on Detection Probability of Space-based AIS for Real Scenarios. <http://ijssst.info/Vol-17/No-30/paper3.pdf> (дата обращения: 05.09.2016). doi: 10.5013/IJSSST.a.17.30.03

UDC 621.390

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification SystemSkorokhodov Ya. A.^a, PhD, Tech., yaroslavskor@gmail.comAndreev A. M.^a, PhD, Tech., Associate Professor, aandreev961@yandex.ru^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Live experiments with detachable elements (final stages) of carrier rockets, transfer orbit stages and satellites in order to evaluate the potential for receiving automatic identification system signals in space are expensive. In some cases, using results of mathematical modeling is sufficient to obtain well-founded solutions for space system design and to plan the application of an orbital constellation in the future. **Purpose:** Developing a simulation model of space system functioning for automatic identification of sea vessels. **Results:** We have developed and implemented a simulation model which allows you to estimate the target indicators of space systems for sea vessel identification and locating, taking into account various spatial and energy factors and conditions for radio signal propagation, as well as the actual location of the controlled objects in the World ocean or coastal zones. With this model, varying its constraints and assumptions, you can, on the one hand, to compare the simulation results with analytical calculations and, on the other hand, to obtain estimates of space system target indicators under conditions as close to reality as possible. The adequacy of developed models and algorithms is confirmed by experimental studies of a sea vessel automatic identification system. **Practical relevance:** The presented model can be used to solve the following problems: estimating quantitative indicators of vessel detection quality for a given orbital constellation structure; selecting orbital constellation parameters for given indicators of sea vessel detection; evaluating the energy availability of the signals for various orbital motion parameters and other conditions.

Keywords — Automatic Identification System, Information Processing, Simulation Modeling, Space Systems.

Citation: Skorokhodov Ya. A., Andreev A. M. Modeling the Space Segment of Sea Vessel Identification System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 36–48 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.36

References

- Kuznetsov A. M., Romanov A. A., Romanov A. A. Model for Receiving AIS Signals Collisions on Space. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 25–36 (In Russian).
- Chen Y. Detection Probability Analysis of Space-based AIS Signal by Using Geometrical Model. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 2014, vol. 4, pp. 161–171.
- Hoye G., Eriksen T., Meland B. J., Narheim G. Space-based AIS for Global Maritime Traffic Monitoring. *Acta Astronautica*, 2008, vol. 62, pp. 240–245.
- Trong T. V., Dinh Q. T., Van T. D., Quang H. P., Nguyen H. Constellation of Small Quick-Launched and Self-Deorbiting Nano-Satellites with AIS Receivers for Global Ship Traffic Monitoring. *Proc. 2nd Nano-Satellite Symp.*, Tokyo, Japan, March 2011. Available at: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:424564/FULLTEXT01.pdf> (accessed 05 September 2016).
- Romanov A. A., Romanov A. A., Tyulin A. E. Small Satellites for Vessels and Airplanes Monitoring in JSC “Russian Space System”: Status and Perspectives. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 3–10 (In Russian).
- Marine Traffic*. Available at: <https://www.marinetraffic.com/ru> (accessed 05 November 2016).
- VesselFinder*. Available at: <https://www.vesselfinder.com> (accessed 05 November 2016).
- Skorokhodov Ya. A., Malyshev D. V. The Analysis of ADS-B Signals Energy Availability to Low-Space Satellites with Use of Statistical Modeling. *Informatsiia i kosmos*, 2017, no. 4, pp. 143–147 (In Russian).
- Narimanov G. S. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Space Vehicles Flight Theory Fundamentals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 608 p. (In Russian).
- Sukhanov A. A. *Astrodinamika* [Astrodynamics]. Moscow, Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN Publ., 2010. 201 p. (In Russian).
- Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time-Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Band*. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371-3-200706-S/en> (accessed 10 September 2016).
- Lysenko L. N. *Navedenie i navigatsiia ballisticheskikh raket* [Ballistic Missiles Guidance and Navigation]. Moscow, MGTU im. N. E. Baubana Publ., 2007. 669 p. (In Russian).

13. Menghui Y., Yongzhong Z., Li F. Collision and Detection Performance with Three Overlap Signal Collisions. *Proc. of 11th Intern. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications "Space-based AIS Reception"*, Liverpool, United Kingdom, Jun. 25–27, 2012, pp. 1641–1648.
 14. *REPORT ITU-R M.2084. Satellite Detection of Automatic Identification System Messages*. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2084> (accessed 05 September 2016).
 15. *REPORT ITU-R M.2169 Improved Satellite Detection of AIS*. Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2169-2009-PDF-E.pdf (accessed 05 September 2016).
 16. Mendes S., Amado S., Teresa V., Scorzolini A., Perini V., Sorbo A. Satellite AIS — an End-to-End Simulation Approach. *Proc. 11th Intern. WS on Simulation & EGSE Facilities for Space Programmes*, Noordwijk, Netherlands, September 28–30, 2010. Available at: <https://indico.esa.int/indico/event/109/session/15/contribution/48/material/0/0.pdf> (accessed 05 September 2016).
 17. Chen Y. *Research on Detection Probability of Space-based AIS for Real Scenarios*. Available at: <http://ijssst.info/Vol-17/No-30/paper3.pdf> (accessed 05 September 2016). doi:10.5013/IJSSST.a.17.30.03
-
-

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 62-83:621.314:621.382

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.49

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СКОЛЬЗЯЩЕМ РЕЖИМЕ АКТИВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ТОКА

А. А. Ефимов^а, доктор техн. наук, профессор, efa33@aanet.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Постановка проблемы: традиционные алгоритмы широтно-импульсной модуляции и прогнозирующего релейно-векторного управления активными преобразователями тока не в полной мере отвечают требованиям практического применения. Так, например, при использовании в векторных системах регулирования первые алгоритмы характеризуются существенной колебательностью сетевых и выходного токов, а вторые излишне сложны. Совместить простоту реализации системы автоматического управления с обеспечением ее робастности и устойчивости позволяет принцип разрывного управления в скользящем режиме. **Цель:** разработка единого алгоритма разрывного управления в скользящем режиме фазовым сдвигом сетевых токов относительно сетевых напряжений, сетевыми и выходными токами трехфазного активного преобразователя тока, работающего в режимах активного выпрямителя тока и сетевого инвертора тока, а также синтез его системы управления и моделирование динамических режимов работы этой системы. **Результаты:** на основании предложенного алгоритма управления для трехфазного мостового активного преобразователя тока разработана функциональная схема системы с разрывным управлением в скользящем режиме, благодаря которой унифицированы ее регуляторы и упрощена структура системы автоматического управления. В среде MatLab/Simulink создана моделирующая программа, позволяющая анализировать динамические показатели функционирования синтезированной системы автоматического управления активного преобразователя тока, работающего в режимах активного выпрямителя и сетевого инвертора тока. Математическое моделирование показало, что разработанный алгоритм управления обеспечивает динамические показатели работы синтезированной системы автоматического управления, не уступающие традиционным алгоритмам, существенное уменьшение реактивных элементов активного преобразователя тока и значительное улучшение формы сетевых токов. Использование в активном преобразователе тока единого алгоритма разрывного управления в скользящем режиме вместо алгоритмов широтно-импульсной модуляции и прогнозирующего релейно-векторного управления упрощает структуру системы автоматического управления и обеспечивает ее робастность. **Практическая значимость:** разработанная процедура синтеза единого разрывного регулятора сетевых и выходного токов является простой, хорошо адаптированной для микропроцессорной реализации. Активный преобразователь тока может успешно применяться для модернизации традиционных тиристорных электроприводов постоянного тока в целях повышения их динамических показателей путем замены в них тиристорных выпрямителей с системами импульсно-фазового управления на активные преобразователи.

Ключевые слова — активный преобразователь тока, алгоритмы и системы управления, разрывное управление, скользящие режимы, математическое моделирование.

Цитирование: Ефимов А. А. Моделирование системы управления в скользящем режиме активным преобразователем тока // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 49–59. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.49

Citation: Efimov A. A. Simulation of Sliding Mode Control System for Active Current Converter. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 49–59 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.49

Введение

Наиболее перспективной возможностью обеспечения энергосбережения и повышения экономичности использования электрической энергии в полупроводниковых преобразователях систем генерирования электроэнергии и регулируемого электропривода как постоянного, так и переменного тока является применение в них схем активных преобразователей [1].

Изучению режимов работы, свойств, возможностей и применения активных преобразователей, а также построения замкнутых систем автоматического управления (САУ) в различных электромеханических системах уделялось и уделяется значительное внимание как у нас в стране, так и за рубежом. Однако наиболее широко представлены работы, в которых анализируются

принципы построения, математическое описание и системы управления активных преобразователей напряжения, а также электромеханических систем на их основе. Построение активных преобразователей тока (АПТ), работающих в режиме источника тока, — активных выпрямителей тока (АВТ), а также сетевых инверторов тока, изучение их свойств, математическое описание и синтез систем управления разработаны в меньшей степени [1–9]. И только в последние годы внимание к этим преобразователям существенно возросло [10–15]. Особенно актуальны за рубежом вопросы построения разрывных и прогнозирующих релейно-векторных (ПРВ) систем управления [16–20]. Традиционно в системах управления АПТ при регулировании сетевых и выходного токов (СВТ), а также фазы сетевых токов относительно сетевых напряжений используются алгоритмы широтно-

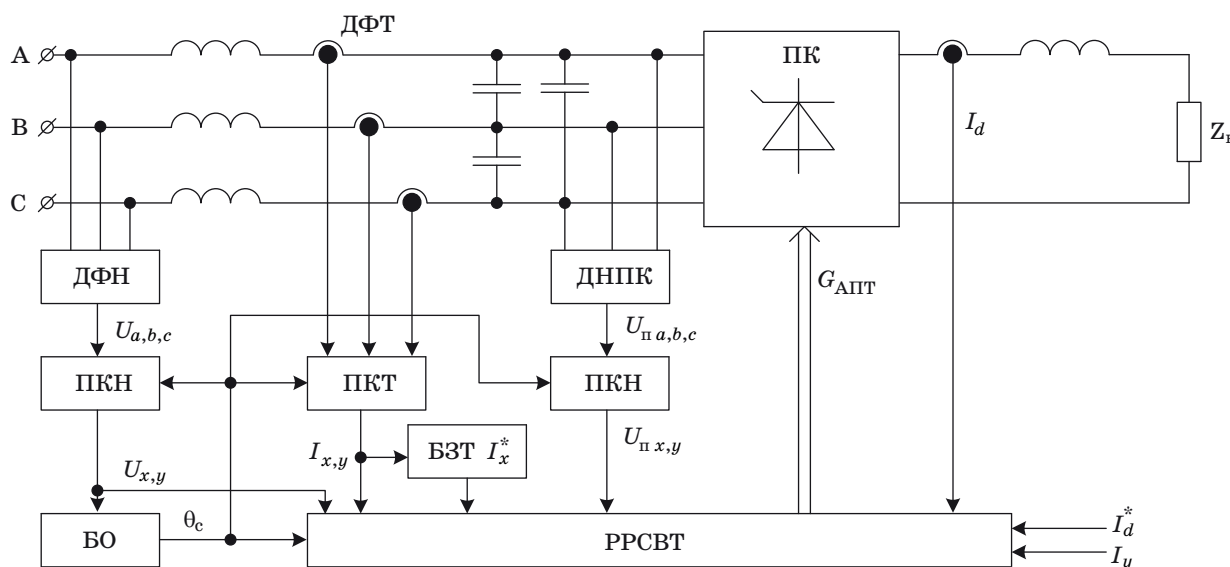
импульсной модуляции (ШИМ) и векторные САУ, основанные на координатном подходе. В данном случае характерна значительная колебательность переходных процессов, вызванная последовательным включением с полупроводниковым коммутатором АПТ сетевого LC-фильтра. Для демпфирования этих колебаний приходится вводить в САУ АПТ обратные связи по производным сетевых токов, что усложняет структуру системы [1–4, 7, 10]. Использование алгоритмов ПРВ-управления, хорошо адаптированного для микропроцессорной реализации, позволяет решить проблему устранения колебаний СВТ, но поиск оптимального управления требует расчета всех возможных состояний проводящих ключей АПТ, что усложняет реализацию этого алгоритма [6, 11, 12]. В теории автоматического управления известен принцип разрывного управления в скользящем режиме, характеризующийся простотой реализации и робастностью процессов. Этот принцип был реализован в алгоритме разрывного (релейного) регулирования сетевых токов, а для регулирования выходного тока использовался ПИ-регулятор [8, 9, 15]. Для унификации регуляторов и упрощения САУ целесообразно создать единый разрывной регулятор, работающий в скользящем режиме.

Целью данного исследования является разработка единого алгоритма разрывного управления в скользящем режиме фазовым сдвигом сетевых токов относительно сетевых напряжений, СВТ трехфазного АПТ, работающего в режимах АВТ и сетевого инвертора тока, а также синтез САУ АПТ и моделирование динамических режимов работы этой системы.

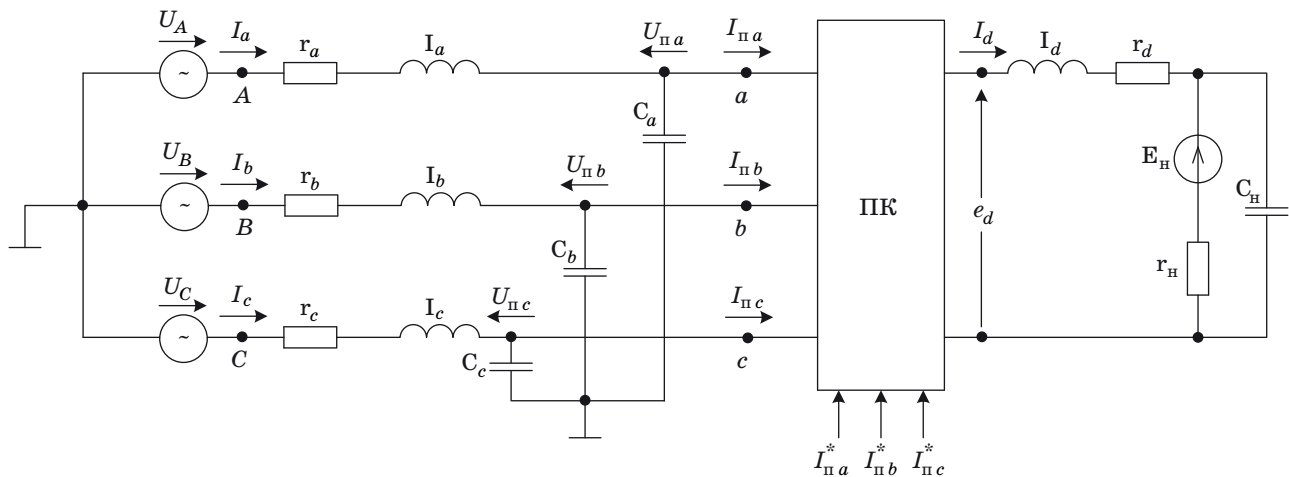
Функциональная схема САУ трехфазного мостового АПТ

Функциональная схема САУ трехфазного мостового АПТ, реализующая алгоритм единого разрывного регулятора сетевых и выходного токов (РРСВТ), работающего в скользящем режиме, представлена на рис. 1.

В силовой схеме АПТ блок полупроводникового коммутатора *ПК* представляет собой трехфазную мостовую схему, реализованную на полностью управляемых ключах с односторонней токовой проводимостью. Каждый ключ реализован либо на GTO-тиристорах, либо на IGBT-транзисторах с последовательно включенным диодом. Для реализации анализируемого алгоритма работы в состав САУ АПТ входят следующие датчики и блоки. Сетевое напряжение и напряжение на входе *ПК* измеряются датчиками фазных напряжений *ДФН* и датчиками напряжений полупроводникового коммутатора *ДНПК*, а фазные токи — датчиками фазных токов *ДФТ*. Измеренные переменные с помощью двух преобразователей координат напряжений *ПКН* и преобразователя координат тока *ПКТ* преобразуются в двухфазную синхронно вращающуюся с результирующим вектором питающего напряжения координатную систему (x, y) . Блок ориентации *БО* вычисляет угол поворота синхронно вращающейся координатной системы θ_c относительно оси фазы А. Задание на активную составляющую задающего вектора сетевого тока I_x^* формируется по текущему состоянию, т. е. сетевой ток стабилизируется на уровне, который обеспечивает заданный выпрямленный ток, который пропорционален I_x . Для получения



■ **Рис. 1.** Функциональная схема САУ АПТ с единым РРСВТ, работающим в скользящем режиме
 ■ **Fig. 1.** Functional diagram of ACS with united discontinuous regulator of network and output currents (DRNOC), working in sliding mode



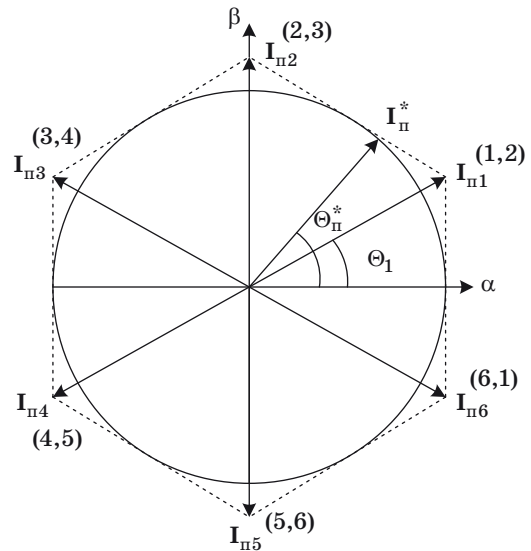
■ **Рис. 2.** Схема замещения АПТ в режиме АВТ
 ■ **Fig. 2.** The substitution scheme of ACC in the mode of ACR

его в САУ включен блок задания тока БЗТ I_x^* , в котором реализовано усреднение текущего значения тока I_x фильтром первого порядка с постоянной времени T_x .

Силовой схеме АПТ соответствует его схема замещения (рис. 2) [1–4]. Помимо ПК, в состав АПТ входит трехфазный сетевой фильтр с параметрами $r_i, l_i, C_i, i = a, b, c$, емкости которого преобразованы в эквивалентную звезду, а также индуктивный фильтр выпрямленного тока l_d, r_d . Нагрузка представлена активным сопротивлением r_H и противо-ЭДС E_H , с емкостью C_H . Питается АПТ от трехфазной симметричной сети напряжением 220/380 В, частота которого равна 50 Гц. Условно-положительные направления токов силовой схемы АПТ соответствуют режиму работы схемы в качестве АВТ и отражают процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока. В трехфазной мостовой схеме АПТ существует всего девять состояний, когда ток проводят только два ключа (один в анодной, другой в катодной группе).

Нумерация ключей стандартная (1, 3, 5 — в катодной и 4, 6, 2 — в анодной группе). В зависимости от комбинации замкнутых ключей существует шесть ненулевых результирующих векторов тока неизменной амплитуды, равной $I = \frac{2}{\sqrt{3}} i_d$, с фазовыми углами Θ_i , принимающими в неподвижной системе координат (α, β) дискретные значения: $\Theta_i = (2i - 1) \frac{\pi}{6}$, где $i = 1...6$ — номер сектора (рис. 3) [1–3].

Кроме того, в трехфазном АПТ существует три нулевых результирующих вектора сетевого тока, характеризующих одновременную проводимость ключей в одном из плеч ПК и соответствующих



■ **Рис. 3.** Вектор задания (задающий вектор) I_π^* и результирующие векторы $I_{\pi(i)}$ АПТ
 ■ **Fig. 3.** The vector of the task (the setting vector) I_π^* and the space vectors $I_{\pi(i)}$ ACC

началу координат. Отсчет секторов начинается от вещественной оси α . Их номера совпадают с индексом (номером) результирующего вектора тока, расположенного в конце соответствующего сектора. Номера проводящих ключей у результирующих векторов указаны в круглых скобках.

Алгоритм разрывного управления в скользящем режиме

В алгоритме векторной ШИМ АПТ [2, 3] среднее за период ШИМ значение вектора тока на входе ПК, равное модулю вектора задания I_π^* , полу-

чается за счет использования двух ненулевых и одного нулевого результирующих векторов, наиболее близких к требуемому среднему значению тока. В алгоритмах разрывного и прогнозирующего релейно-векторного управления [5–9] на интервале дискретизации Δt , который называется также интервалом управления, реализуется только одно значение результирующего вектора. При разрывном управлении выбор его заранее определен алгоритмом, а при ПРВ-управлении требуется поиск оптимального. Выбор необходимого для реализации результирующего вектора в каждом из алгоритмов осуществляется по-разному, на основании своих правил [2, 3, 6, 8, 9, 11–13].

Отличие предложенного в данной работе алгоритма управления по сравнению с алгоритмом, представленным в работах [8, 9], заключается в организации регулирования в координатной системе (x, y) , вращающейся синхронно и синфазно с результирующим вектором сетевого фазного напряжения, что позволило реализовать единый РРСВТ, исключив пропорционально-интегральный регулятор выходного тока АПТ. При этом идея метода разрывного управления [5, 8, 9] сохраняется, но скользящий режим создается по границе поверхности разрыва, заданной уравнениями $S_x = 0, S_y = 0$. Функции $S_j, j = x, y$ зависят от порядка системы и, в частности для LC-фильтра, имеющего второй порядок, определяются как линейная комбинация ошибки управления и ее производной. При возникновении скользящего режима координаты ошибки и ее производной стремятся к нулю с постоянной времени τ , величина которой выбирается при синтезе регулятора.

При этом основная задача синтезируемого разрывного РРСВТ заключается в установлении такой последовательности переключения силовых ключей ПК, при которой потребляемые из сети токи были бы близки к синусоидальным, регулировалась фаза сетевых токов относительно сетевых напряжений, а выходной ток стабилизировался на заданном уровне. Поверхность скольжения при этом определяется следующими выражениями функций переключения, которые следуют из дифференциальных уравнений, описывающих процессы во входной цепи АПТ в синхронно вращающейся координатной системе (x, y) [1–3]:

$$\begin{cases} S(e_x, e_{\Theta_x}, t) = K_d(I_d^* - I_d) + K_i(I_x^* - I_x) + \\ + \tau_x \left(-\omega_c I_y^* - \frac{U_x - r_\Phi I_x - U_{\text{П}x}}{l_\Phi} \right) = 0; \\ S(e_y, e_{\Theta_y}, t) = (I_y^* - I_y) + \\ + \tau_y \left(\omega_c I_x^* - \frac{U_y - r_\Phi I_y - U_{\text{П}y}}{l_\Phi} \right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где обозначенные заглавными буквами напряжения и токи — постоянные проекции результирующих векторов этих переменных на оси координатной системы (x, y) ; K_i и K_d — коэффициенты, определяющие степень предпочтения в регулировании сетевых или выходного токов; $r_\Phi = r_i, l_\Phi = l_i$; $I_x^* = \text{Re}(\mathbf{I}_\text{П}^*), I_y^* = \text{Im}(\mathbf{I}_\text{П}^*)$; ω_c — циклическая частота питающей сети; τ_x, τ_y — параметры, зависящие от постоянной времени желаемой реакции входных токов и определяющие скорость затухания переходного процесса в скользящем режиме, выбранные равными $\tau_x = \tau_y = \tau = 0,00003$ с. Эти параметры рассчитывались по соотношениям

$$\tau_x = l_\Phi \tau_\alpha; \tau_y = l_\Phi \tau_\beta,$$

где τ_α и τ_β — аналогичные коэффициенты, определяющие скорость затухания переходного процесса скользящего режима в алгоритме релейного векторного управления АПТ, реализованного в неподвижной координатной системе (α, β) [8, 9]. Это обеспечивало сопоставимое быстродействие разрабатываемого алгоритма и алгоритма, представленного в работах [8, 9].

Для определения порядка включения силовых ключей используется следующее правило, аналогичное представленному в [8, 9]:

- если $S_x > 0$, то надо включить такие ключи, чтобы i_x увеличивался;
- если $S_x < 0$, то надо включить такие ключи, чтобы i_x уменьшался;
- если $S_y > 0$, надо включить такие ключи, чтобы i_y увеличивался;
- если $S_y < 0$, то надо включить такие ключи, чтобы i_y уменьшался.

Данный набор правил, который образует алгоритм функционирования единого РРСВТ, можно представить таблицей, где указаны номера ре-

- Выбор результирующего вектора по номеру сектора и знаку S_x и S_y
- The choice of the space vector by sector numbers and sign S_x and S_y

| № сектора | S_x | S_y | Вектор/ключи | № сектора | S_x | S_y | Вектор/ключи |
|-----------|-------|-------|--------------|-----------|-------|-------|--------------|
| 1 | < 0 | < 0 | 4/4, 5 | 4 | < 0 | < 0 | 1/1, 2 |
| | < 0 | > 0 | 3/3, 4 | | < 0 | > 0 | 6/6, 1 |
| | > 0 | < 0 | 6/6, 1 | | > 0 | < 0 | 3/3, 4 |
| | > 0 | > 0 | 1/1, 2 | | > 0 | > 0 | 4/4, 5 |
| 2 | < 0 | < 0 | 5/5, 6 | 5 | < 0 | < 0 | 2/2, 3 |
| | < 0 | > 0 | 4/4, 5 | | < 0 | > 0 | 1/1, 2 |
| | > 0 | < 0 | 1/1, 2 | | > 0 | < 0 | 4/4, 5 |
| | > 0 | > 0 | 2/2, 3 | | > 0 | > 0 | 5/5, 6 |
| 3 | < 0 | < 0 | 6/6, 1 | 6 | < 0 | < 0 | 3/3, 4 |
| | < 0 | > 0 | 5/5, 6 | | < 0 | > 0 | 2/2, 3 |
| | > 0 | < 0 | 2/2, 3 | | > 0 | < 0 | 5/5, 6 |
| | > 0 | > 0 | 3/3, 4 | | > 0 | > 0 | 6/6, 1 |

зультирующих векторов и ключей АПТ, которые необходимо включать в зависимости от номера сектора, в котором находится задающий вектор сетевого тока, и значений функций S_x и S_y , рассчитанных на текущем интервале управления.

Моделирование САУ АПТ в среде MatLab/Simulink

Для рассмотренной выше функциональной схемы САУ АПТ и предложенного алгоритма управления была разработана соответствующая схема моделирования в среде MatLab/Simulink (рис. 4).

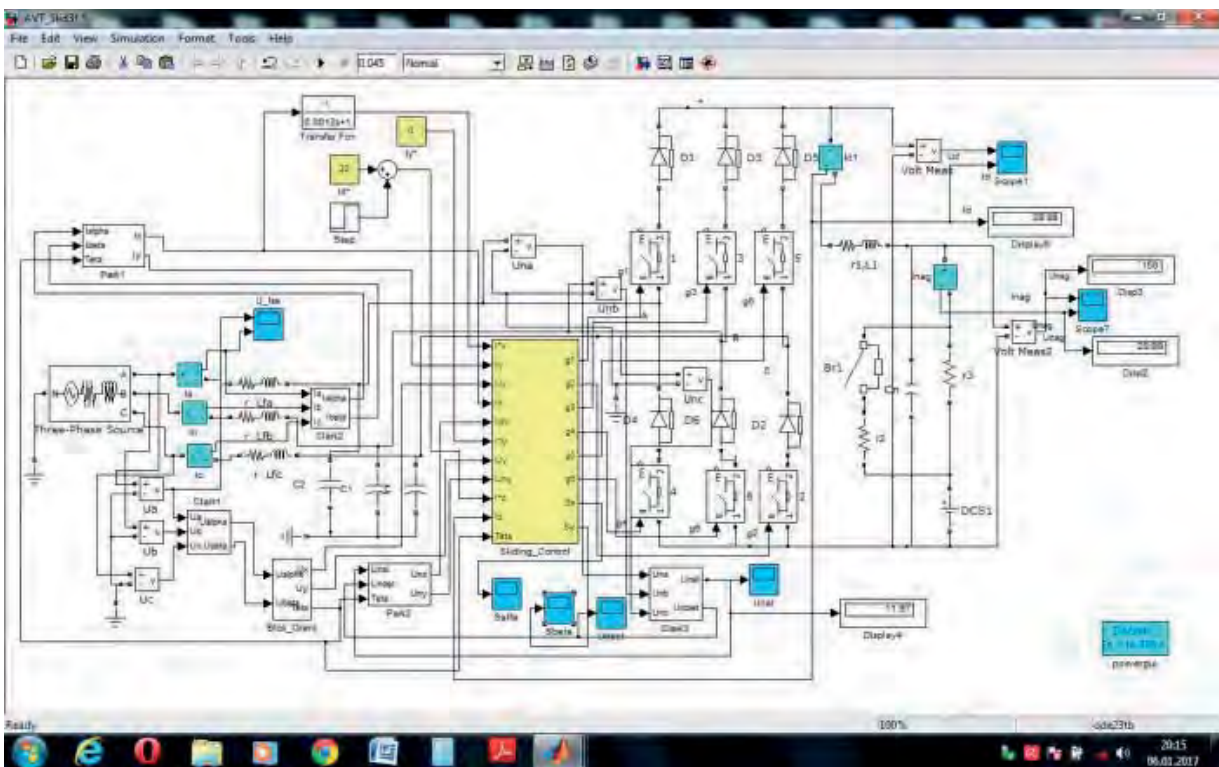
Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: фазное напряжение $U_c = 220$ В, частота $f = 50$ Гц, параметры сетевого фильтра: $r_i = 0,057$ Ом, $l_i = 0,003$ Гн, $C_i = 14,1$ мкФ (звезда). Параметры выходного дросселя: $l_d = 0,037$ Гн, $r_d = 0,32$ Ом, $r_H = 10$ Ом, $C_H = 50$ мкФ, $E_H = 0$ В. Параметры силовой схемы были рассчитаны по традиционной методике, применяемой при реализации широтно-импульсного способа управления АПТ. Эти параметры были использованы в макетном образце АПТ и публикациях автора [8, 9]. В [8] представлено сопоставление показателей переходных процессов АВТ, полученных

в макете и при моделировании с использованием алгоритма ПРВ-управления, а в [9] — экспериментальных данных, полученных в макете при алгоритмах векторной ШИМ и ПРВ-управления.

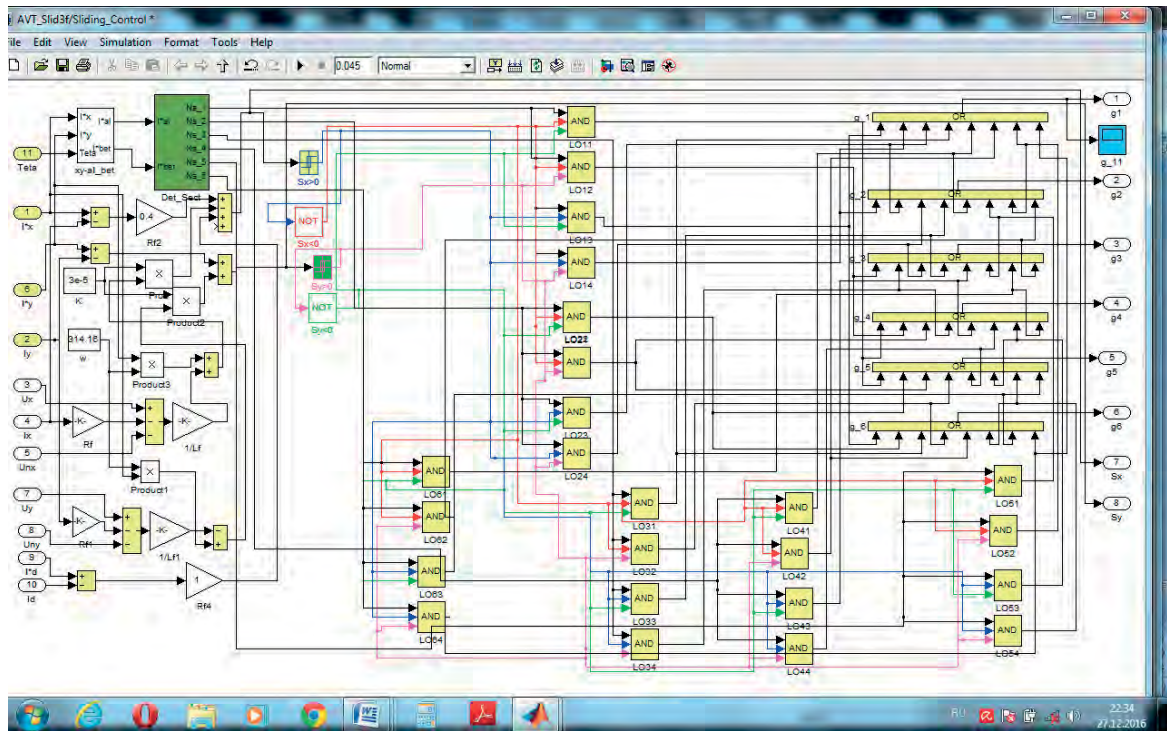
Моделировался режим уменьшения сопротивления нагрузки в два раза в момент времени $t = 0,015$ с и увеличения в момент времени $t = 0,03$ с задающего сигнала на величину выпрямленного тока I_d^* с 20 до 30 А. Задание на реактивную составляющую вектора сетевого тока установлено равным нулю, поэтому моделировался режим с единичным коэффициентом сдвига между сетевыми фазными напряжениями и токами в режиме выпрямителя. Постоянная времени $T_x = 0,0012$ с.

Разрывный регулятор сетевых и выходного токов, на схеме моделирования обозначенный как Sliding_Control, реализован в соответствии с выражениями (1) ($K_i = 0,4$ и $K_d = 1,0$) и алгоритмом переключения ключей АПТ, представленным в таблице. Схема реализации разработанного алгоритма приведена на рис. 5.

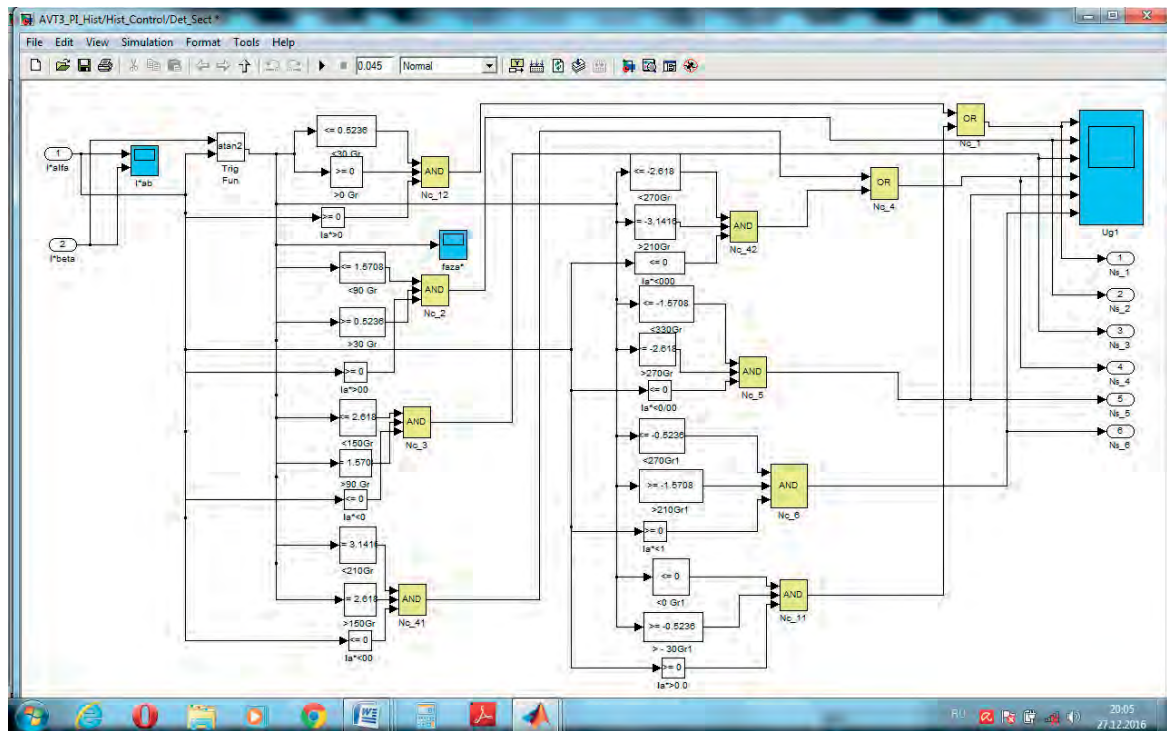
Для реализации этого алгоритма работы необходима информация о номере сектора, в котором находится вектор задания (задающий вектор) I_{Π}^* . Эта информация получается с помощью блока Det_Sect (см. рис. 5), схема реализации которого в схеме моделирования представлена на рис. 6.



■ **Рис. 4.** Схема моделирования САУ АПТ с ПРВТ в среде MatLab /Simulink
 ■ **Fig. 4.** Scheme of modeling ACC ACS with DRNOC in MatLab / Simulink environment



■ *Рис. 5.* Схема реализации алгоритма PPCBT АПТ (Sliding_Control)
 ■ *Fig. 5.* Scheme of the implementation of the DRNOC algorithm ACC (Sliding_Control)

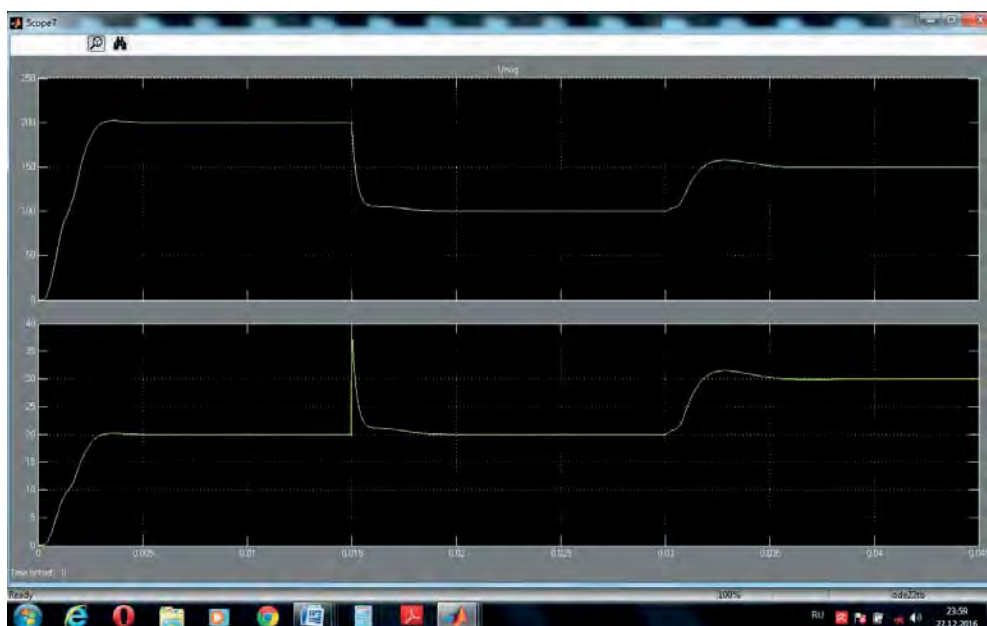


■ *Рис. 6.* Реализация в модели блока определения сектора, в котором находится вектор задания (задающий вектор) I_{II}^*
 ■ *Fig. 6.* The implementation in the model of the sector definition block, in which vector of the task (the setting vector) I_s^* to be

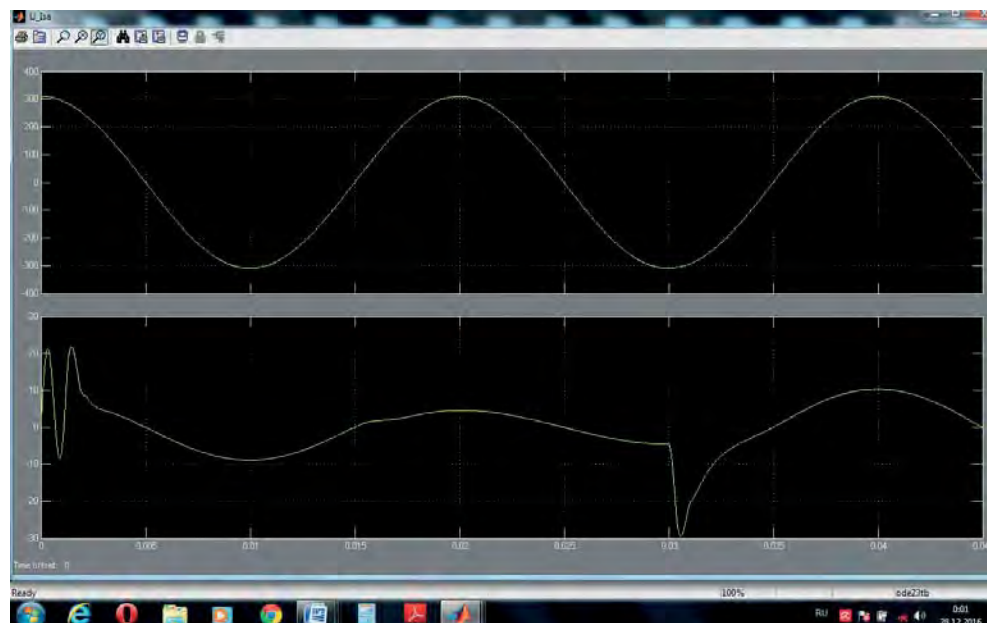
Определитель сектора Det_Sect определяет номер сектора в неподвижной системе координат, поэтому в блок Sliding_Control добавлен блок x, y_al_bet , реализующий преобразование активной и реактивной составляющих задающего вектора тока из синхронно вращающейся координатной системы (x, y) в неподвижную систему координат (α, β) . Выходные и сетевые напряже-

ния и токи АПТ в режиме АВТ при реализации анализируемых режимов работы представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Сравнение полученных результатов с аналогичными результатами из работ [8, 9] показывает, что длительность отработки задания на величину выпрямленного тока 3 мс совпадает. Коэффициент гармоник сетевого тока при ПРВ-



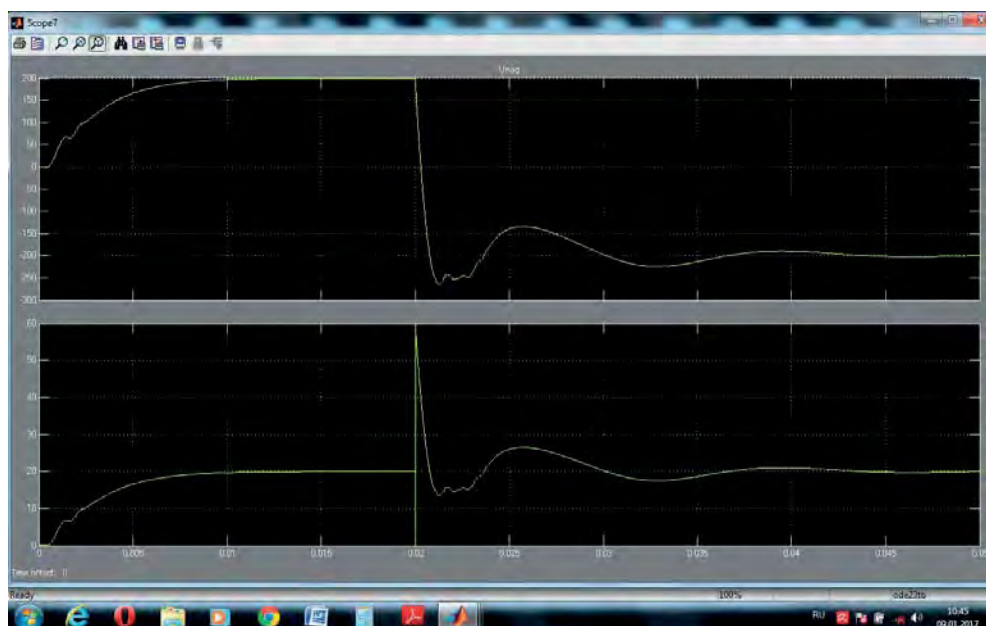
■ **Рис. 7.** Выходное напряжение и ток нагрузки в режиме АВТ
 ■ **Fig. 7.** Output voltage and load current in ACR mode



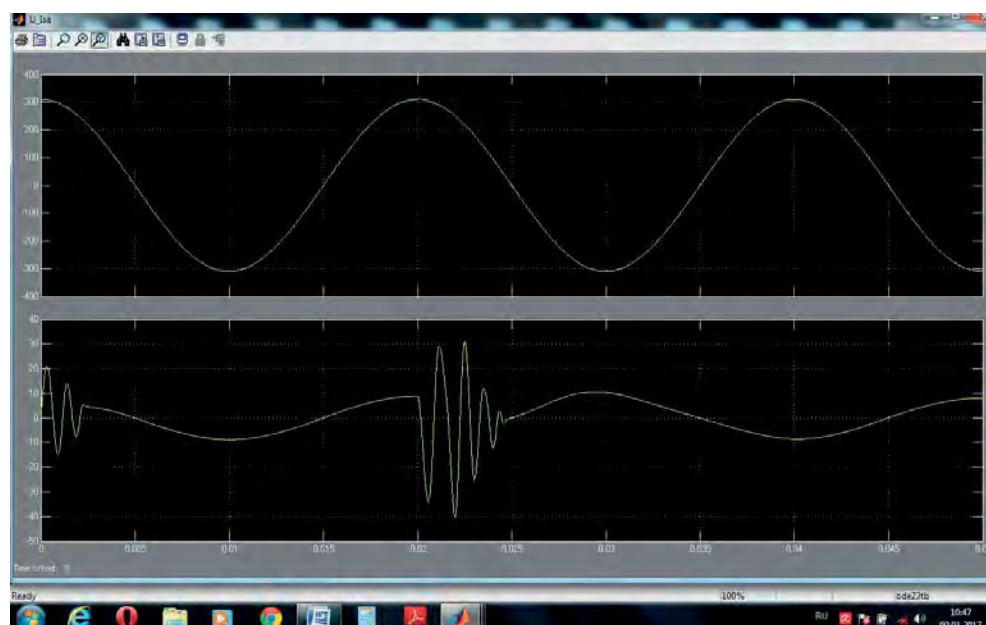
■ **Рис. 8.** Сетевое фазное напряжение и ток фазы А в режиме АВТ
 ■ **Fig. 8.** Mains phase voltage and phase A current in ACR mode

управлении, полученный ранее при моделировании, составил 10 %, экспериментально — 9 %, а при векторной ШИМ, экспериментально — 12 % при тактовой частоте 4 кГц. При анализируемом алгоритме в установившихся режимах сетевые токи синусоидальны, их коэффициент гармоник практически равен нулю. Они синфазны с напря-

жениями питания. Это свидетельствует о том, что индуктивности сетевых фильтров завышены и могут быть уменьшены. Однако их оптимизация не входила в круг решаемых задач, как и анализ энергетических показателей работы АПТ, что является направлением дальнейших исследований. Путем изменения в алгоритме управления (1) ко-



■ **Рис. 9.** Выходное напряжение и ток нагрузки при переводе АПТ из выпрямительного в инверторный режим работы
 ■ **Fig. 9.** Output voltage and load current when ACC switch from rectifier to inverter operation



■ **Рис. 10.** Сетевые фазное напряжение и ток фазы А при переводе АПТ из выпрямительного в инверторный режим работы
 ■ **Fig. 10.** Mains phase voltage and phase A current during the transition of ACC from rectifier to inverter operation

эффицентов K_i и K_d возможно влиять на показатели качества регулирования СВТ нагрузки. Изменением задания на реактивную составляющую вектора сетевых токов можно регулировать коэффициент сдвига сетевых токов относительно питающих напряжений.

Разработанная САУ позволяет также анализировать работу схемы АПТ в режиме сетевого инвертора тока. Однако в схеме АПТ перевод из выпрямительного в инверторный режим более сложен, в отличие от схемы активного преобразователя напряжения (АПН). Благодаря двухсторонней токовой проводимости каждого силового ключа при изменении направления тока нагрузки при постоянной полярности выходного напряжения схема АПН переходит в инверторный режим автоматически, без изменения алгоритма управления.

В схеме АПТ для перевода из выпрямительного в инверторный режим требуется, во-первых, изменение знака и величины противо-ЭДС в цепи нагрузки при сохранении направления выходного тока и, во-вторых, изменение алгоритма управления. В разработанной САУ это изменение алгоритма управления реализуется путем скачкообразного изменения на 180° фазы задающего вектора тока I_{Γ}^* в блоке $xy - al_bet$. При этом в установившемся режиме работы сетевые токи будут также гармоническими, находящимися в противофазе с сетевыми напряжениями. Процессы в выходной и входной цепях АПТ при переводе его в момент времени $t = 0,02$ с из выпрямительного в инверторный режим работы представлены на рис. 9 и 10. Параметры силовой схемы сохранены неизменными, противо-ЭДС нагрузки $E_H = 400$ В, $\tau_x = \tau_y = \tau = 0,00005$ с, $K_i = 1,0$, $K_d = 0,4$, что несколько увеличивает длительность переходных процессов по сравнению с представленными на рис. 7 и 8. Эти значения τ , K_i и K_d для инверторного режима работы являются наиболее предпочтительными. Длительность переходных процессов в выходной цепи АПТ определяется ее параметрами и составляет 15 мс.

Во входной цепи длительность перевода из выпрямительного в инверторный режим работы чуть меньше 5 мс. В установившемся режиме работы фазные сетевые токи находятся в противофазе с фазными сетевыми напряжениями.

Заключение

Полученные результаты моделирования свидетельствуют об отличных динамических показателях работы единого разрывного алгоритма управления и разработанной САУ АПТ, реализующей скользящий режим.

Возможности разрывного управления АПТ в режимах высокочастотных переключений перспективны в плане уменьшения его реактивных элементов, что создает предпосылки его применения как в системах электропривода, так и, особенно, в системах генерирования электроэнергии автономных объектов, требующих наиболее существенного снижения их массо-габаритных показателей.

Реализация предложенного алгоритма управления гораздо проще, чем алгоритма ПРВ-управления, так как отпадает необходимость поиска оптимального (одного из девяти) состояний проводящих ключей АПТ, что позволяет упростить создание его микропроцессорной системы регулирования.

Активный преобразователь может успешно применяться для модернизации традиционных тиристорных электроприводов постоянного тока в плане замены в них тиристорных выпрямителей с системами импульсно-фазового управления на активные преобразователи в целях повышения их динамических и энергетических показателей.

Полученные в работе результаты при условии проведения дополнительных исследований энергетических показателей работы и сравнения их с экспериментальными испытаниями рассмотренной САУ АПТ в дальнейшем предполагается применить при разработке авиационных систем генерирования электроэнергии.

Литература

1. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. — Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. — 250 с.
2. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.
3. Shreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Active Current Converter Mathematical Model // Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electron-

- ics and Motion Control (EPE PESC-2000), Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000. Vol. 2. P. 2-188–2-193.
4. Doval-Gandoy J., Castro C., Penalver C. M. Dynamic and Steady — State Analysis of a Three Phase Buck Rectifier // Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PESC-2000), Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000. Vol. 2. P. 2-134–2-137.
5. Pires V. E., Fernando Silva J. Sliding Mode Current Controller for Three — Phase Single — State AC/DC Buck — Boost Converters // Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electronics and Motion Con-

- trol (EPE PEMS-2000), Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000. Vol. 2. P. 1-151–1-156.
6. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Зиновьев Г. С., Корюков К. Н., Мухаматшин И. А., Калыгин А. И. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока // Электротехника. 2004. № 10. С. 43–50.
 7. Wiseman J. C., Wu B. Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction // IEEE Transactions on Industrial Electronics. June 2005. Vol. 52. Iss. 3. P. 758–764.
 8. Ефимов А. А., Мухаматшин И. А. Управление активными преобразователями в системах электропитания и электропривода // Изв. РАН. Энергетика. 2005. № 4. С. 91–112.
 9. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухаматшин И. А. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты // Электротехника. 2005. № 9. С. 47–53.
 10. Adzic M. S., Adzic E. M., Katic V. A. Space Vector Modulated Three-Phase Current Source Converter for DC Motor Drive // 14th Intern. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMS 2010), Macedonia, 2010. P. T5-52–T5-59.
 11. Ефимов А. А. Управление активными преобразователями в составе электромеханических систем // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. Вып. 2. СПб.: ГУАП, 2012. С. 58–67.
 12. Ефимов А. А., Косулин В. Д., Мельников С. Ю. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 48–53.
 13. Ефимов А. А. Управление активными преобразователями тока // Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2014. С. 61–67.
 14. Волков А. Г. Многозонные электронные конвертеры для автономных систем генерирования электрической энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: НГТУ, 2016. — 21 с.
 15. Ефимов А. А., Мельников С. Ю. Управление активным однофазным выпрямителем тока // Завалишинские чтения: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2017. С. 157–162.
 16. Michalik Jan, Molnar Jan, Peroutka Zdenek. Optimal Control of Traction Single-Phase Current-Source Active Rectifier // 14th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMS 2010), Macedonia, 2010. P. T9-82–T9-88.
 17. Choi D. Dynamic Performance Improvement of AC/DC Converter Using Model Predictive Direct Power Control with Finite Control Set // IEEE Trans. Ind. Electron. 2015. Vol. 62. N 2. P. 757–767.
 18. Zhang Y. Performance Improvement of Two Vectors Based Model Predictive Control of PWM Rectifier // IEEE Trans. Power Electron. 2016. Vol. 31. N 8. P. 6016–6030.
 19. Kwak S. Model-Predictive Direct Power Control with Vector Preselection Technique for Highly Efficient Active Rectifiers // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11. N 1. P. 44–52.
 20. Tingting He, Li Li, Jianguo Zhu, Linfeng Zheng. A Novel Model Predictive Sliding Mode Control for AC/DC Converters with Output Voltage and Load Resistance Variations // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2016. P. 422–431.

UDC 62-83:621.314:621.382
doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.49

Simulation of Sliding Mode Control System for Active Current Converter

Efimov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, efa33@aanet.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Conventional algorithms for pulse width modulation or predictive relay-vector control over active current converters do not fully meet the requirements of practical application. For example, when used in vector control systems, the first algorithms presume significant fluctuations in the network and output currents, while the second ones are unnecessarily complicated. The principle of sliding-mode discontinuous control combines the simplicity of automatic control system implementation with ensuring its robustness and stability. **Purpose:** Developing a unified algorithm for sliding-mode discontinuous control by a phase shift of the network currents in reference to the network voltages, by the network and output currents of a three-phase active current converter operating in the modes of an active current rectifier and a network current inverter; also synthesis of their control system and simulation of its dynamic operation modes. **Results:** Based on the proposed control algorithm for an active three-phase bridge current converter, a functional scheme was developed for a system with discontinuous control in a sliding mode. It allows you to unify the regulators and simplify the structure of the automatic control system. In MATLAB/Simulink environment, a simulation program was created which you can use to analyze the dynamic performance of the synthesized automatic control system for an active current converter operating in the modes of an active rectifier or a network current inverter. Mathematical modeling showed that the developed control algorithm provides dynamic performance indicators of the synthesized automatic control system not inferior to the conventional algorithms, a significant reduction in the reactive elements of the active current converter, and a much better shape of the network currents. This unified algorithm of discontinuous control in a sliding mode instead of pulse-width modulation algorithms, along with predictive relay-vector control provides the opportunity to simplify the structure of the automatic control system and ensure its robustness. **Practical relevance:** The developed procedure for the synthesis of a single discontinuous regulator of the network and output currents is simple and well adapted

for microprocessor implementation. An active current converter can be successfully used to modernize traditional thyristor DC electric drives in order to improve their dynamic performance through replacing their thyristor rectifiers with pulse-phase controllers by active transducers.

Keywords — Active Current Converter, Control Algorithms and Systems, Discontinuous Control, Sliding Modes, Mathematical Modeling.

Citation: Efimov A. A. Simulation of Sliding Mode Control System for Active Current Converter. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 49–59 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.49

References

1. Efimov A. A., Schreiner R. T. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [The Active Converters in Alternative Electric Drivers]. Novouralsk, NGTI Publ., 2001. 250 p. (In Russian).
2. Schreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Algorithms and Mathematical Description of the Active PWM Rectifiers. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2000, no. 10, pp. 42–49 (In Russian).
3. Schreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Active Current Converter Mathematical Model. *Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMS-2010)*, Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000, vol. 2, pp. 2-188–2-193.
4. Doval-Gandoy J., Castro C., Penalver C. M. Dynamic and Steady — State Analysis of a Three Phase Buck Rectifier. *Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMS-2000)*, Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000, vol. 2, pp. 2-134–2-137.
5. Pires V. E., Fernando Silva J. Sliding Mode Current Controller for Three — Phase Single — State AC/DC Buck-Boost Converters. *Proc. of 9th Intern. Conf. and Exhibition on Power Electronics and Motion Control (EPE PEMS-2000)*, Kosice, Slovakia, September 5–7, 2000, vol. 2, pp. 1-151–1-156.
6. Schreiner R. T., Efimov A. A., Zinoviev G. S., Koryukov K. N., Muhamatshin I. A., Kalygin A. I. Predictive Ladder Vector Control Frequency Converters Active in the AC Drive Systems. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2004, no. 10, pp. 43–50 (In Russian).
7. Wiseman J. C., Wu B. Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, June 2005, vol. 52, iss. 3, pp. 758–764.
8. Efimov A. A., Muhamatshin I. A. Control Active Converters in Energy Supply Systems and Electric Drive. *Izvestiia RAN. Energetika*, 2005, no. 4, pp. 91–112 (In Russian).
9. Schreiner R. T., Efimov A. A., Muhamatshin I. A. Relay Control Active Current Frequency Converters. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2005, no. 9, pp. 47–53 (In Russian).
10. Adzic M. S., Adzic E. M., Katic V. A. Space Vector Modulated Three-Phase Current Source Converter for DC Motor Drive. *14th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMS 2010)*, Macedonia, 2010, pp. T5-52–T5-59.
11. Efimov A. A. Control Active Converters Consisting of Electromechanical Systems. *Izvestiia GUAP. Aerokosmicheskoe priboroostroenie*, Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2012, iss. 2, pp. 58–67 (In Russian).
12. Efimov A. A., Kosulin V. D., Melnikov S. Y. Predicts Relay-Vector Control of Active Current Converters. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 48–53 (In Russian).
13. Efimov A. A. Control Active Current Converters. *Zavalishinskie chteniia* [Zavalishin Reading], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 61–67 (In Russian).
14. Volkov A. G. *Mnogozonnye elektronnye konvertory dlia avtonomnykh sistem generirovaniia elektricheskoi energii*. Dis. kand. tehn. nauk [Multi-Zone Electronic Converters for Autonomous Systems Generate Electrical Energy. PhD tech. sci. diss.]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2016. 21 p. (In Russian).
15. Efimov A. A., Melnikov S. Y. Control Active Single-Phase Rectifier. *Zavalishinskie chteniia* [Zavalishin Reading], Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2017, pp. 157–162 (In Russian).
16. Michalik Jan, Molnar Jan, Peroutka Zdenek. Optimal Control of Traction Single-Phase Current-Source Active Rectifier. *14th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE-PEMS 2010)*, Macedonia, 2010, pp. T9-82–T9-88.
17. Choi D. Dynamic Performance Improvement of AC/DC Converter Using Model Predictive Direct Power Control with Finite Control Set. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 757–767.
18. Zhang Y. Performance Improvement of Two Vectors Based Model Predictive Control of PWM Rectifier. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, vol. 31, no. 8, pp. 6016–6030.
19. Kwak S. Model-Predictive Direct Power Control with Vector Preselection Technique for Highly Efficient Active Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 44–52.
20. Tingting He, Li Li, Jianguo Zhu, Linfeng Zheng. A Novel Model Predictive Sliding Mode Control for AC/DC Converters with Output Voltage and Load Resistance Variations. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, pp. 422–431.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРНОЙ И ГИПЕРВИЗОРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ

А. В. Гордеев^а, доктор техн. наук, профессор, ff2avg@mail.ru

Д. В. Горелик^а, магистрант, de5509@mail.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: при построении системы для удаленной работы студентов со своими виртуальными машинами важно правильно выбрать главный принцип виртуализации, что позволит надежно и легко разделять множества виртуальных машин разных пользователей и при этом наиболее эффективно расходовать вычислительные ресурсы сервера. **Цель:** определить, насколько медленнее будут работать виртуальные машины в вычислительном кластере при использовании технологии контейнеров по сравнению с традиционной технологией использования гипервизора, насколько меньше при этом потребуется оперативной памяти и стоит ли использовать контейнеры ради упрощения в решении важнейшей задачи разделения множеств виртуальных машин разных пользователей. **Результаты:** получены зависимости потребления основных вычислительных ресурсов от количества запускаемых виртуальных машин. Анализ полученных результатов показал, что в случае построения кластера серверов с общим внешним устройством хранения данных для запуска большого количества виртуальных машин, работающих в пакете программ VirtualBox, выгоднее использовать контейнеры с добавлением программного обеспечения Docker. **Практическая значимость:** при создании вычислительного кластера контейнерная технология виртуализации с использованием Docker и VirtualBox позволяет не только существенно экономить оперативную память при запуске большого количества виртуальных машин, но и увеличивает скорость вычислений.

Ключевые слова — виртуальные машины, кластер, гипервизор, контейнер, VirtualBox, Docker.

Цитирование: Гордеев А. В., Горелик Д. В. Сравнительное тестирование контейнерной и гипервизорной виртуализации // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 60–66. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.60

Citation: Gordeev A. V., Gorelik D. V. Comparative Testing of Container and Hypervisor Virtualizations. Informatsionno- upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 60–66 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.60

Введение

При построении системы для удаленной работы студентов со своими виртуальными машинами [1] возник вопрос о выборе главного принципа виртуализации. Обычно программное обеспечение Oracle VirtualBox [2], которое было выбрано в качестве основы для построения названной системы, используют на хост-системе, и получается гипервизорная виртуализация, где в роли гипервизора выступает хост-система с Ubuntu Server 16.04. Достоинства и недостатки этого подхода в целом известны. Обоснование выбора программного обеспечения Oracle VirtualBox и проблема, которую приходится решать для изоляции подмножества виртуальных машин и сетей одного пользователя от виртуальных машин и сетей другого пользователя (при необходимости предоставить возможность работать со своими виртуальными машинами большому количеству пользователей), была описана и решена в работе [1]. Однако проблемы изоляции виртуальных машин и сетей одного пользователя от виртуальных машин и сетей другого пользователя относительно легко решаются при использовании контейнеров и платформы Docker. Docker — открытая платформа для запуска приложений в свободно

изолированной среде (в контейнере) [3]. Поэтому возникла идея провести исследования, которые ответили бы на вопросы: насколько можно сэкономить оперативной памяти (ОП) в хост-системе в случае использования контейнерной виртуализации по сравнению с гипервизорной и насколько мы при этом потеряем в быстродействии. Проведенные эксперименты неожиданно показали, что при использовании контейнеров и программного обеспечения Docker при организации кластерных вычислений мы не только легко решаем проблему изоляции виртуальных машин и сетей одного удаленного пользователя от другого, но и получаем даже выигрыш в скорости вычислений и затратах ОП.

Напомним, что контейнерная виртуализация — это такой метод виртуализации, при котором ядро операционной системы поддерживает вместо одного сразу несколько изолированных экземпляров пространства пользователя [4]. Скорее всего, эта идея была заимствована от реентерабельных программ, которые позволяют иметь один экземпляр кода, но несколько процессов могут его исполнять параллельно, каждый — со своими наборами переменных, что снижает расходы ОП. Как известно, обращение к переменным реентерабельной программы осуществляет

ся с помощью косвенной адресации, причем текущие переменные, как правило, располагаются на вершине стека, из которого под новый процесс выделяется новый блок ячеек памяти. Запрос (и освобождение) такого блока памяти осуществляется посредством обращения к системной подпрограмме, которая выполняет затребованные действия при отключенной системе прерываний для того, чтобы обеспечить целостность этой операции. Таким образом, контейнерная виртуализация является более эффективной в плане расходования памяти, но теряет в быстродействии из-за дополнительных расходов на вычисление адресов. Сам гипервизор работает следующим образом: в операционной системе хоста эмулируется аппаратное обеспечение, поверх которого запускаются гостевые операционные системы. Это дает нам понять, что связь между гостевой и хостовой операционными системами следует четкому правилу: все, что делает используемая аппаратная часть, должно быть доступно и гостевой операционной системе со стороны хостовой [5].

Контейнеры, в свою очередь, напротив, являются виртуализацией на уровне операционной системы. А это уже подразумевает, что есть гостевая операционная система, которая использует то же самое ядро, что и хостовая. Такой подход дает контейнерам большое преимущество: они могут быть меньше и компактнее гипервизорных гостевых сред, поскольку у них с хостом намного больше общего, чем у виртуальных машин. То есть контейнерная виртуализация не использует полноценные виртуальные машины, как это делается в случае гипервизоров, а создает виртуальное окружение с собственным пространством процессов и сетевым стеком. Экземпляры пространств пользователя (часто называемые контейнерами или зонами) с точки зрения пользователя полностью идентичны реальному серверу, но они в своей работе используют один экземпляр ядра операционной системы. Ядро обеспечивает полную изолированность контейнеров, поэтому программы из разных контейнеров не могут воздействовать друг на друга. Очевидно, что главным недостатком этой технологии является то, что виртуальная среда задается хост-системой, и она будет одна и та же для всех пространств, которые мы можем создать. Для преодоления данного недостатка было предложено модернизировать эту технологию до понятия докера (Docker). Докеры могут быть с разным виртуальным окружением, хоть и работать на одной и той же хост-системе [6].

Для возможности запускать на GNU/Linux-системе виртуальные машины с ОС Microsoft Windows можно создать соответствующие Linux-контейнеры и с помощью программного обеспечения Docker установить пакет программ

VirtualBox. Контейнеры изолируют виртуальные машины VirtualBox, запускаемые разными пользователями. Важно, что внутри одного контейнера могут работать сразу несколько виртуальных машин одного пользователя, а каждому пользователю предоставляется свой контейнер.

Описание эксперимента

Для построения кластерной системы это очень важно, так как виртуальные машины одного пользователя могут легко и быстро взаимодействовать друг с другом через виртуальные сети. При этом виртуальные машины и сети разных пользователей могут быть запущены на разных узлах кластера. Поскольку это кластер серверов, то в качестве общего внешнего устройства выступает сетевая система хранения данных NetGear 3200, которая предоставляет по i-SCSI-протоколу единый том X-RAID-6-уровня. На этом томе располагаются файлы виртуальных машин, благодаря чему они могут быть доступны для любого узла кластера. Пользователь работает со своими виртуальными машинами через тот сервер, который будет иметь наименьшую нагрузку в кластере.

Соответственно, для сравнительного анализа рассматриваемых методов виртуализации посредством тестирования в целях выбора наиболее эффективного метода нужно было разработать методику получения интересующих нас параметров — потребляемых вычислительных ресурсов.

Было предложено в качестве нагрузки на сервер, на котором будут работать виртуальные машины, взять процедуру инсталляции операционной системы. Эта процедура задействует сразу все виды ресурсов и сопровождается высокой процессорной нагрузкой, большим потреблением ОП, интенсивной работой с внешними устройствами и, что очень важно, активной работой с накопителем на магнитных дисках (как правило, это виртуальные накопители, в качестве которых используются файлы хост-системы). Часть процедуры инсталляции, которая обычно требует интерактивного взаимодействия с пользователем (системный администратор во время инсталляции отвечает на некоторые вопросы), была автоматизирована. Автоматизация ответов была выполнена созданием нового файла ответов, в котором заранее подготовлены все ответы на все вопросы. Это позволило проводить эксперименты без воздействия интерактивной составляющей, которая могла бы повлиять на результаты эксперимента. Для снятия показаний был написан специальный скрипт на языке Bash, который с момента его запуска записывает в отдельный файл время в секундах, нагрузку CPU (Central

Processing Unit) в процентах и расходование оперативной памяти в процентах.

Следующим шагом подготовки к проведению исследования был выбор алгоритма, по которому непосредственно проводились бы эксперименты. В ходе подготовки был разработан следующий метод: так как в нашем кластере [1] имеются два идентичных сервера на базе платформы Supermicro E210C-M3, то было принято решение на одном из них проводить эксперимент с обычными виртуальными машинами, а на втором проводить эксперименты с докерами (контейнерами). А так как мы строим кластер серверов, то оба этих вычислительных сервера имеют доступ к общему хранилищу. Далее необходимо было подготовить серверы, установив VirtualBox для сервера, на котором используется гипервизорная виртуализация, а для сервера с контейнерной — программное обеспечение Docker. Это открытая платформа для разработки, доставки и эксплуатации приложений [7]. В своем ядре это программное обеспечение позволяет запускать практически любое приложение, безопасно изолированное внутри контейнера, что дает возможность обезопасить работу хост-системы. То есть события, происходящие в контейнере, никак не влияют. Благодаря безопасной изоляции можно запускать на одном хосте много контейнеров одновременно. За счет легковесной природы контейнера, который запускается без дополнительной нагрузки гипервизора на аппаратную часть сервера, используется меньше ресурсов.

Также в связи с возможностью использовать разные методы хранения данных необходимо провести сравнительный анализ быстродействия сетевого хранилища и обычного (локального) накопителя на жестких магнитных дисках, установленного непосредственно в сервер хранилища данных. Нужно проанализировать, как эти средства и технологии хранения данных повлияют на быстродействие и производительность виртуальных машин и контейнеров, и выбрать наилучший из имеющихся вариантов.

С целью имитировать работу студентов на кластере был определен необходимый минимум виртуальных машин и контейнеров, который соответствовал бы одновременной работе, например, пяти пользователей (студентов). Так, на первом сервере требовалось создать 10 виртуальных машин — по две машины на студента. После создания, т. е. определения конфигурации виртуального компьютера, а это процесс достаточно быстрый и не требующий больших ресурсов, запускается скрипт документирования потребляемых вычислительных ресурсов. Далее запускаются собственно виртуальные машины, и уже непосредственно в них сразу начинается автоматизированная установка операционных

систем. Вышеупомянутый скрипт протоколирует потребление вычислительных ресурсов этими виртуальными машинами.

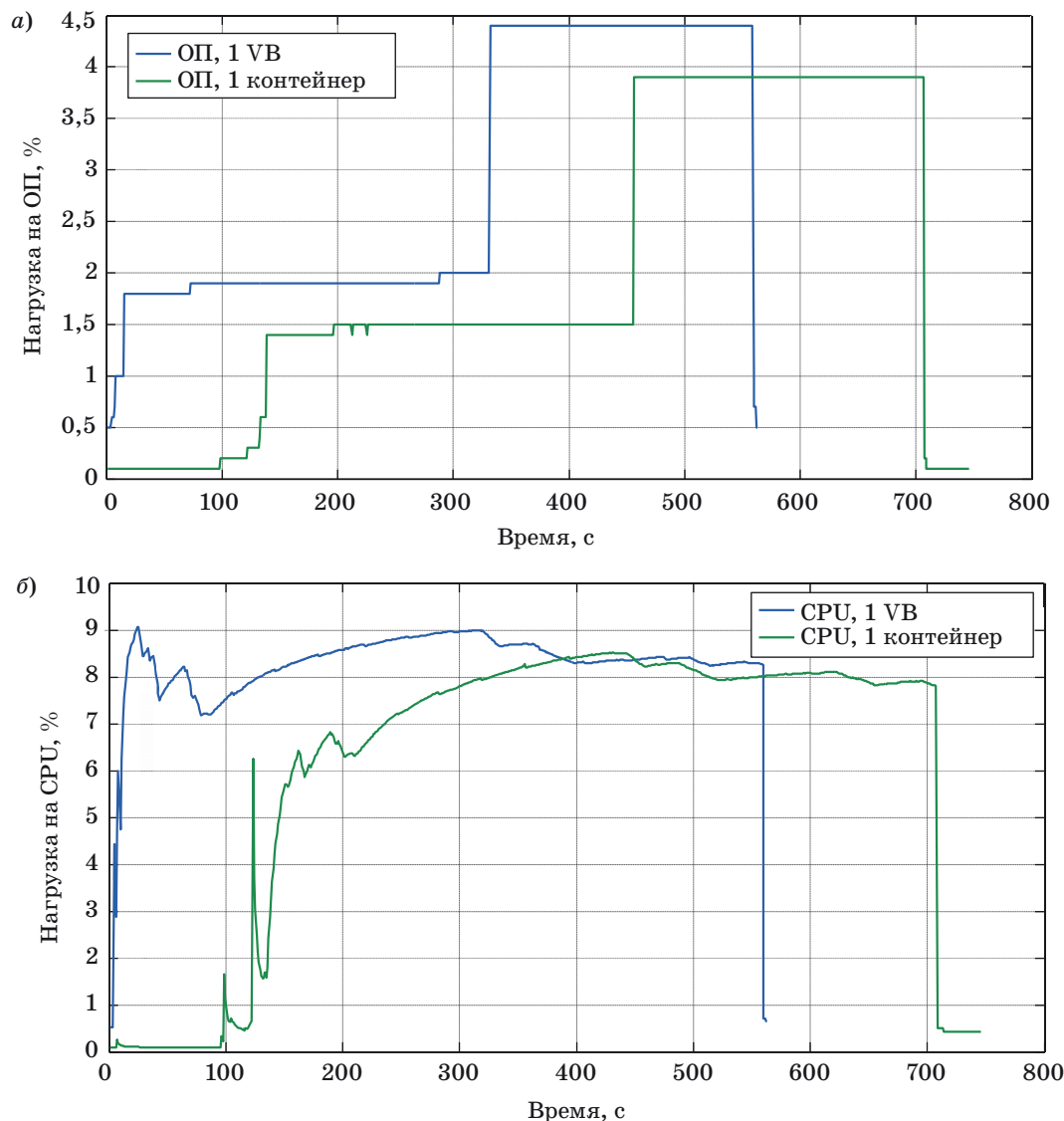
Для имитации нагрузки на второй сервер были созданы пять контейнеров со специальным набором программного обеспечения, необходимого для организации работы с графическими приложениями в контейнерах. Затем в каждом контейнере было создано по две виртуальные машины, и уже непосредственно после окончания процедуры их создания запускался скрипт документирования нагрузки, а следом запускались все виртуальные машины и шла автоматизированная установка операционных систем.

В обработку результатов входил ряд последовательных этапов, которые включают в себя приведение данных к табличному виду и построение представленных ниже графиков.

Рассмотрим графики, на которых показан тестовый эксперимент с одной виртуальной машиной и одним контейнером с одной виртуальной машиной (рис. 1, *а* и *б*). Наглядно видно, что обычная виртуальная машина работает быстрее, чем аналогичная, но в контейнере, потребляя при этом больше вычислительных ресурсов. Как и ожидалось, контейнер показал меньшее потребление ресурсов, но более продолжительную работу. Если посмотреть на форму и поведение графиков, то они идентичны: основным пиком нагрузки на ОП является период непосредственной установки операционной системы, это вторая часть графика. По сравнению с первой частью графика, который отображает фазу распаковки файлов из образа, нагрузка возросла приблизительно в 2 раза. Это говорит о том, что собственно построение (сборка) системы из двоичных файлов требует существенно больше ресурсов, чем подготовка этих двоичных файлов.

По нагрузке на CPU виртуальная машина более требовательна, ей необходимо больше вычислительной мощности. Конечно, в масштабах сервера это не столь значительно, если мы говорим об одной виртуальной машине.

Посмотрим на графики тестирования виртуальных машин, расположенные на рис. 2, *а* и *б*. Здесь мы запускаем уже по 10 виртуальных машин на одном сервере. Обратим внимание на то, что тут представлены результаты двух экспериментов: кривые зеленого и синего цветов иллюстрируют поведение серверов с использованием внешнего сетевого хранилища, а красного и голубого — работу серверов с использованием локального накопителя. Различия в том, что были использованы разные технологии доступа к накопителям данных. На рис. 2, *а* представлена зависимость нагрузки на ОП от времени. Эксперимент номер один был проведен с использованием сетевой системы хранения данных NetGear 3200,



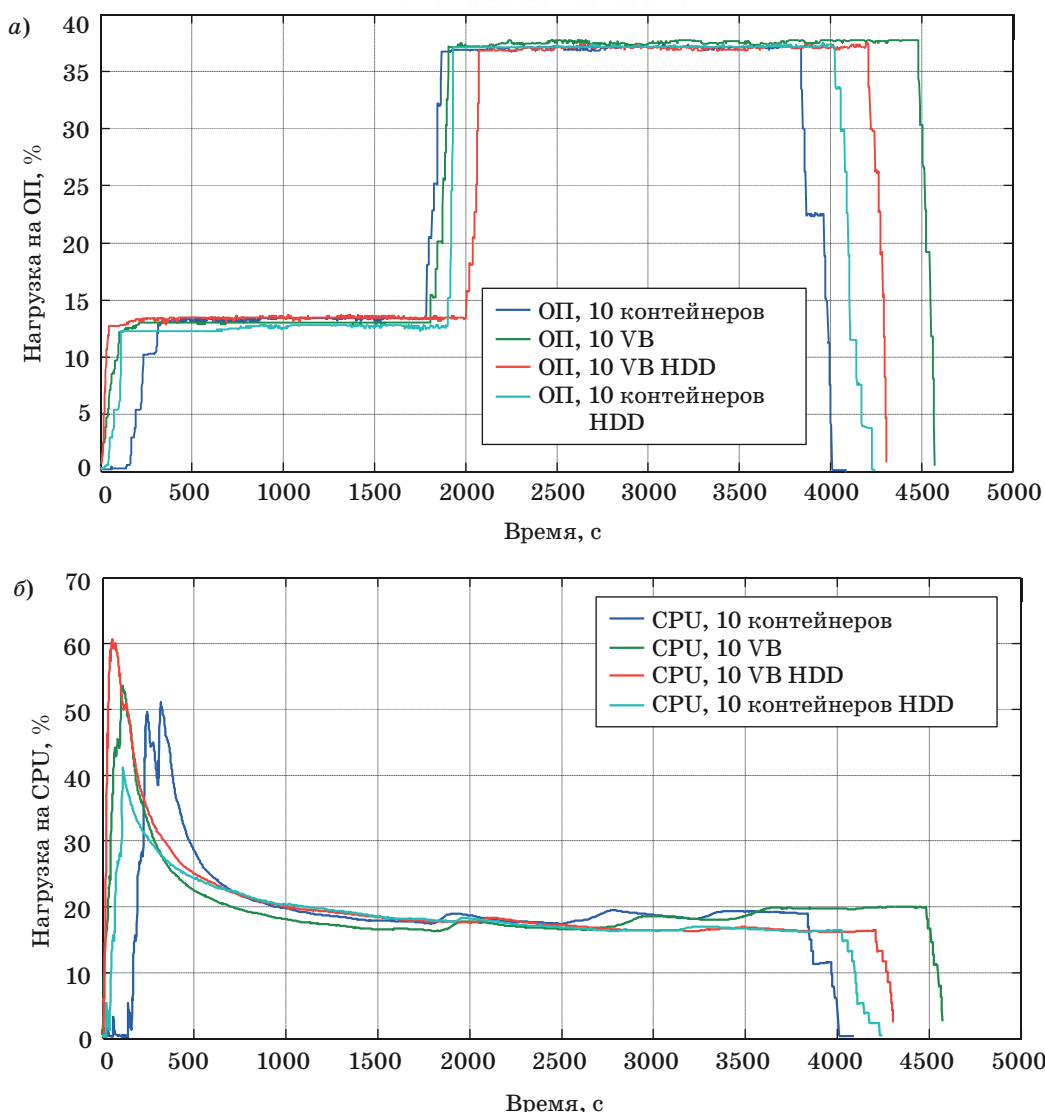
■ **Рис. 1.** Нагрузка на оперативную память (а) и CPU (б) в эксперименте с одним контейнером и одной виртуальной машиной

■ **Fig. 1.** RAM load (a) and CPU load (б) in experiment with one container and one virtual machine

которая предоставляет единый том X-RAID-6-уровня по i-SCSI-протоколу. Из графика видно, что контейнерное решение обрабатывает быстрее на 600–800 с. То есть при конфигурации с использованием протокола i-SCSI контейнерная виртуализация оказывается быстрее. Если посмотреть на график рис. 2, б, то можно обнаружить, что контейнерная виртуализация с применением Docker не только быстрее, но она еще и меньше нагружает процессор. То есть по графику рис. 2, а уровень потребления ОП одинаковый, а потребление ресурсов процессора меньше. Возникает вопрос: почему контейнеры работают быстрее, когда их становится больше?

Возможно, что этот эффект достигается за счет использования UnionFS (Union File System) [8].

Это вспомогательная файловая система, производящая каскадно-объединенное монтирование других файловых систем. Она позволяет файлам и каталогам изолированных файловых систем, известных как ветви, прозрачно перекрываться, формируя единую связанную файловую систему. Каталоги, которые имеют тот же путь в объединенных ветвях, будут совместно отображать содержимое в объединенном каталоге новой виртуальной файловой системы. Когда ветви монтируются, то указывается приоритет одной ветви над другой. Следовательно, когда обе ветви содержат файл с идентичным именем, одна ветвь будет иметь больший приоритет. Различные ветви могут одновременно находиться в режиме «только чтение» и «чтение-запись». Таким образом, за-



■ **Рис. 2.** Нагрузка на оперативную память (а) и CPU (б) в эксперименте с десятью контейнерами и десятью виртуальными машинами
 ■ **Fig. 2.** RAM load (a) and CPU load (b) in an experiment with 10 containers and 10 virtual machines

пись в объединенную виртуальную файловую систему будет направлена на определенную реальную файловую систему.

Union File System состоит из слоев (layers). Слои как бы накладываются друг на друга. Все используемые нами контейнеры используют общие защищенные от записи слои, в которых находятся неизменяемые файлы операционной системы контейнера, это приводит к ускорению доступа к данным. А для изменяемых файлов — файлов виртуальных машин, работающих в докерах, — каждый из контейнеров будет иметь собственный слой. Естественно, Docker использует это решение не только для операционной системы, но и для любых общих частей контейнеров, которые были созданы на основе общих

«предков» их образов; скорее всего, что за счет этого он и выигрывает по скорости работы.

То есть получается, что виртуальные машины, использующие технологию гипервизорной виртуализации, создают много идентичных копий операционных систем, которые никак не связаны между собой и потребляют больше аппаратных ресурсов сервера, чем контейнеры, работающие на технологии контейнерной виртуализации с использованием UnionFS.

Рассмотрим последний эксперимент, который проводился с использованием установленных в сервер жестких дисков, т. е. без использования i-SCSI-протокола. Рассмотрев графики на рис. 2, можно заметить, что скорость работы контейнеров, в принципе, упала незначительно, при том

что общая картина потребления вычислительных ресурсов никак не изменилась. А если обратить внимание на работу виртуальных машин, то можно заметить, что в этом случае производительность возросла. То есть за счет исключения сетевых операций на обращение к хранилищу данных и работу с внутренним хранилищем сервера виртуальные машины получают ускорение.

Итак, в результате проведенного исследования был определен круг параметров, от которых зависит производительность двух технологий виртуализации — гипервизорной и контейнерной. Как показал первый (тестовый) эксперимент, если проводить сравнение одной виртуальной машины с одним контейнером, то виртуальная машина работает гораздо быстрее (см. рис. 1), потребляя больше вычислительных ресурсов сервера. Но при увеличении количества виртуальных машин до 10 экземпляров обстановка кардинально меняется в обратную сторону, и контейнеры начинают выигрывать не только по быстродействию, но и по потреблению аппаратных ресурсов, которое у них снижено, благодаря использованию UnionFS.

Существует зависимость и от технологии, применяемой для доступа к хранилищу данных. Мы рассматривали две технологии общего, внешнего серверного хранилища данных. Прежде всего, это по протоколу i-SCSI к единому для обоих серверов тому X-RAID-6-уровня. Кроме этого, провели тестирование при использовании локальных накопителей, организованных в RAID-массив. Исследование показало, что использование общего сетевого хранилища дает еще больший выигрыш контейнерам за счет того, что контейнеры используют UnionFS. А обычные виртуальные машины получают дополнительную задержку за

счет использования сетевого протокола (в отличие от непосредственного доступа к локальным жестким дискам).

Рассмотрев зависимости потребления аппаратных ресурсов, можно сказать, что с увеличением количества единиц виртуальных машин и контейнеров потребность в ресурсах растет одинаково, т. е. зависимость расхода ресурсов относительно друг друга сохраняется. Время выполнения всех операций также растет, но с разной зависимостью.

Заключение

Исследование показало, что хотя потребление вычислительных ресурсов увеличивается практически одинаково с увеличением количества используемых контейнеров и виртуальных машин, контейнеры потребляют ресурсов меньше. Продолжительность выполнения вычислений растет приблизительно одинаково, и тут выигрывают контейнеры, так как обрабатывают быстрее обычных виртуальных машин. Для проектируемой кластерной системы этот критерий является очень важным. Так как используемые внутри контейнеров виртуальные машины безопасно изолированы, то это дает возможность студентам работать отдельно и никак не пересекаться в процессе выполнения лабораторных работ.

Принимая во внимание все полученные результаты, а также все очевидные плюсы контейнерного решения, можно сделать вывод о целесообразности проектировать систему на базе уже развернутой системы дистанционного обучения, но с применением технологии контейнерной виртуализации.

Литература

1. Гордеев А. В. Организация удаленной работы студентов со своими виртуальными машинами // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 96–100. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.96
2. Горелик Д. В. Использование контейнеров для построения системы работы с удаленными виртуальными машинами // Семидесятая Международная студенческая научная конференция ГУАП: сб. докл. Ч. 2. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2017. С. 66–69.
3. Понимая Docker. <https://habrahabr.ru/post/253877> (дата обращения: 15.11.2017).
4. Моуэт Э. Использование Docker. Разработка и внедрение программного обеспечения при помощи технологии контейнеров: руководство. — ДМК-Пресс, 2017. — 300 с.
5. Маркелов А. OpenStack. Знакомство с облачной операционной системой. 2-е изд. — М.: ДМК-Пресс, 2016. — 248 с.
6. Matthias K., Kane S. Docker: Up & Running. Shipping Reliable Containers in Production. — O'Reilly, 2015. — 198 p.
7. Jessie Frazelle. Docker Containers on the Desktop. <https://blog.jessfraz.com/post/docker-containers-on-the-desktop/> (дата обращения: 07.04.2017).
8. Попов С. Образы и контейнеры Docker в картинках. <https://habrahabr.ru/post/272145/> (дата обращения: 17.11.2017).

UDC 004; 621.398; 681.5; 681.324:681.3.001.57
 doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.60

Comparative Testing of Container and Hypervisor Virtualizations

Gordeev A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, ff2avg@mail.ru

Gorelik D. V.^a, Master Student, de5509@mail.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation

Introduction: When building a system for students' remote work with their virtual machines, it is important to correctly choose the main principle of virtualization, which will reliably and easily split the sets of virtual machines of different users, and most efficiently use the computing resources of the server. **Purpose:** Determining how much slower virtual machines in a computing cluster will be when using container technology in comparison with the traditional technology of using hypervisors, how much less RAM is required, and whether it is worth using containers for the sake of simplicity in solving the most important task of splitting sets of virtual machines of different users. **Results:** We have obtained the dependencies of consumption of basic computing resources on the number of virtual machines being run. The analysis of the obtained graphs showed that in the case of building a cluster of servers with a common external storage device in order to run a large number of virtual machines, it is more advantageous to use containers with the addition of Docker software in which VirtualBox will work. **Practical relevance:** This technology allows you not only to significantly save RAM, but also to increase the calculation speed.

Keywords — Virtual Machines, Cluster, Hypervisor, Container, VirtualBox, Docker.

Citation: Gordeev A. V., Gorelik D. V. Comparative Testing of Container and Hypervisor Virtualizations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 60–66 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.60

References

1. Gordeev A. V. Organization of Remote Work of Students with their Virtual Machines. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 2, pp. 96–100 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.96
2. Gorelik D. V. Using Containers to Build a System for Working with Remote Virtual Machines. *Semidesiataia Mezhdunarodnaia studencheskaia nauchnaia konferentsiia. Ch. 2. Tekhnicheskie nauki* [Proc. Seventieth Intern. Student Scientific Conf. SUAI. Part 2. Technical Science]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2017, pp. 66–69 (In Russian).
3. *Ponimaia Docker* [Docker Overview]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/253877> (accessed 15 November 2017).
4. Adrian Mouat. *Using Docker. Developing and Deploying Software with Containers*. O'Reilly, 2015. 335 p.
5. Markelov A. *OpenStack. Znakomstvo s oblachnoi operatsionnoi sistemoi* [OpenStack. Introduction to the Cloud Operating System]. Moscow, DMK-Press Publ., 2016. 248 p. (In Russian).
6. Karl Matthias, Sean Kane. *Docker: Up & Running. Shipping Reliable Containers in Production*. O'Reilly, 2015. 198 p.
7. Jessie Frazelle. *Docker Containers on the Desktop*. Available at: <https://blog.jessfraz.com/post/docker-containers-on-the-desktop/> (accessed 07 April 2017).
8. Popov S. *Obrazy i konteinery Docker v kartinkakh* [Images and Containers Docker in Pictures]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/272145/> (accessed 17 November 2017).

ОБЗОР ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ

И. С. Егорова^а, аспирант, is.egorova@mail.ru

В. М. Ицыксон^а, канд. техн. наук, доцент, vlad@icc.spbstu.ru

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, 195251, РФ

Введение: в связи с тем, что значительная часть программного обеспечения в настоящее время разрабатывается с использованием сторонних библиотек и фреймворков, которые обычно плохо документированы, становится актуальной задача воссоздания соответствующей документации. **Цель:** поиск перспективных подходов автоматизированного извлечения частичных формальных спецификаций программных библиотек, основанных на методах динамического анализа программных проектов, использующих эти библиотеки. **Результаты:** произведены обзор, сравнение и классификация различных формализмов, используемых для описания программных компонентов. Осуществлен обзор подходов, которые могут быть использованы для извлечения такого описания методами динамического анализа. Установлено, что наибольшей точностью из рассматриваемых методов динамического анализа вне зависимости от вида фиксируемых свойств обладают методы, основанные на генерации и проверке гипотез на основе шаблонов. К основным ограничениям подходов группы относятся невозможность восстановления с их использованием спецификаций, описывающих взаимодействие нескольких объектов и изменение состояния библиотеки, а также использование шаблонов. Помимо этого, необходимо отметить, что на данный момент ни один из рассмотренных подходов, основанных на методах как статического, так и динамического анализа, не поддерживает извлечение семантического описания вызовов библиотечных компонентов в процессе восстановления спецификации.

Ключевые слова — спецификация программной библиотеки, формальная спецификация, динамическое извлечение спецификаций, расширенные конечные автоматы, временные свойства, поведенческое описание библиотеки, комплексные правила, динамический анализ.

Цитирование: Егорова И. С., Ицыксон В. М. Обзор динамических методов восстановления частичных спецификаций программных библиотек на основе анализа программных проектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 67–75. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.67

Citation: Egorova I. S., Itsykson V. M. Review of Dynamic Methods for Extraction of Partial Software Library Specification. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 67–75 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.67

Введение

Данная работа является продолжением статьи [1], в которой были представлены результаты обзора формализмов, используемых для восстановления спецификаций компонентов программных библиотек путем анализа проектов, реализованных с их применением, а также результаты обзора подходов для извлечения таких спецификаций с применением методов статического анализа. Объектом изучения, представленного в ней, так же, как и в работе [1], являются подходы, применяемые для автоматизированного восстановления спецификаций программных библиотек путем использования методов эмпирической программной инженерии и извлечения данных из репозиторий. Предметом настоящего обзора выступает исследование подходов, основанных на методах динамического анализа исходного кода программных проектов с точки зрения возможности восстановления с их помощью наиболее развернутого описания правил использования

библиотечных компонентов и достижения наилучшего качества извлекаемых спецификаций. При этом конечной целью является выбор подхода или группы подходов, позволяющих формировать спецификацию анализируемой библиотеки в терминах формализма [2], разработанного ранее авторами.

К отличительным особенностям формализма [2] относятся поддержка возможности отображения в виде иерархии конечных автоматов (КА) комплексных правил, характеризующих как объекты библиотечных классов, так и связи, существующие между ними и состоянием самой библиотеки, а также возможность задания семантики вызовов методов библиотеки.

Среди изученных подходов, основанных на анализе исходного кода программ, использующих библиотеки, извлекать подмножество более простых комплексных правил позволяет только подход, представленный в работе [3], однако информации о систематической оценке качества результирующих спецификаций, получаемых

с его применением, не приводится. Наилучших результатов с точки зрения выразительности и качества (точности порядка 60 %) извлекаемых спецификаций, а также адаптируемости для извлечения комплексных правил позволяет достичь применение методов извлечения временных свойств, основанных на поиске стандартных правил без использования шаблонов [4, 5]. Однако используемые ими модели правил заметно отличаются от выбранной в качестве оптимальной — в виде множества предикатов и в виде модифицированного графа потока управления соответственно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего поиска автоматизированных подходов к восстановлению правил применения компонентов программных библиотек среди подходов, основанных на методах динамического анализа, которые бы позволили получать более точные и более приближенные к целевой модели спецификации.

Динамические методы извлечения спецификаций

Альтернативой применению рассмотренных в статье [1] подходов к извлечению спецификаций библиотек с использованием методов статического анализа является применение методов, основанных на анализе трасс исполнения программ. Такое решение используется в целом ряде работ [6–17]. Методы динамического анализа в заметной степени отличаются друг от друга и могут быть классифицированы по способу конструирования правил:

1) методы, генерирующие правила применения объектов библиотечного класса [8, 10] (CONTRACTOR++, ТЕМІ), [15, 16];

2) методы, распознающие правила использования таких объектов путем анализа трасс существующих программ [6, 7, 9, 10] (SEKT), [11–14, 17].

С использованием подходов, относящихся к *первой* группе, возможные состояния объектов класса могут быть исследованы путем генерации (по шаблонам) и проверки предикатов. При этом описываться с помощью таких предикатов могут как предусловия, постусловия и инварианты вызовов методов [15, 16], так и абстрактные состояния объектов класса [8, 10] (CONTRACTOR++, ТЕМІ). В качестве входа могут быть использованы как исключительно декларативные описания [8, 10] (CONTRACTOR++), [15], так и трассы вызовов методов исследуемого интерфейса в контексте использующих программ [16], а также их комбинация [10] (ТЕМІ). Большая часть генеративных методов позволяет получать правила, описываю-

щие временные свойства [8] или ограничения на значения состояний целевого объекта и параметры вызовов [15, 16] отдельно. В работе [10] были предложены подходы CONTRACTOR++ и ТЕМІ для построения комплексных правил на основе извлеченной информации. Восстанавливаемые таким образом правила будут представлять собой КА, в которых состояниями являются допустимые комбинации извлеченных предикатов, описывающих условия вызова методов класса, а дугами — разрешенные по предусловиям/постусловиям переходы между ними.

Необходимо отметить, что, в отличие от временных свойств, извлекаемых с применением методов статического анализа и большинства методов, использующих трассы существующих программ [6, 7, 9, 12, 14, 17], выявляемые с использованием методов группы правила будут описывать не стандартные (частые), а разрешающие правила (за исключением метода [16]). Существенным ограничением с точки зрения выразительности извлекаемых спецификаций является то, что получаемые правила могут описывать требования к данным и временным свойствам для объектов единственного выбранного класса. Описание правил взаимодействия объектов разных классов с использованием рассматриваемых решений получено быть не может. Для снижения ресурсоемкости процесса генерации правил используется взаимозависимость предикатов [15, 16], а также вводятся ограничения на длину цепочек [15, 16] или на количество применяемых шаблонов и проверяемых переменных [16]. Для повышения удобства дальнейшего использования полученных результатов дополнительно может быть также осуществлено удаление эквивалентных или более слабых, «поглощаемых» предикатов [15, 16] или удаление предикатов, описывающих несвязанные переменные [16]. В случае с временными свойствами [10] (ТЕМІ) информативность получаемых спецификаций также может быть повышена путем перевода действительно наблюдаемых в трассах переходов из состояния «вероятных» в состояние «актуальных» (при этом соответствующие им целевые состояния дублируются).

Стратегии для извлечения спецификаций с использованием методов *второй* группы заметно варьируются. Их можно разделить на три подгруппы:

1) распознавание КА [6, 7, 13, 17];

2) восстановление автомата с использованием алгоритма k-tails и его модификаций [9, 10] (SEKT), [11];

3) использование методов статистического анализа [12, 14].

В зависимости от реализуемого решения анализируемые трассы могут содержать события

(информацию об объектах, вызываемых методах, параметрах, используемых переменных и соответствии вызовов участкам исходного кода), описывающие последовательность вызовов как в контексте всей программы, использующей библиотеку [6, 10] (SEKT), [13, 14, 17], так и в рамках отдельных ее методов [11, 12], а также события, относящиеся к использованию конкретных объектов [7, 9].

Извлечение спецификаций, осуществляемое на основе методов первой подгруппы [6, 7, 13, 17], предполагает использование событий входной трассы в качестве цепочки символов, которая подается на вход КА, описывающему распознаваемое регулярное выражение. Для каждой последовательности событий, которая потенциально может быть описана с использованием данного выражения, осуществляется проверка того, что прием соответствующей строки переводит автомат в корректное состояние. Результаты распознавания запоминаются, и правило для конкретной последовательности событий считается успешно распознанным при преодолении задаваемого порогового значения количества «принятых» фрагментов трассы. Авторами работы [6] была предложена функция, позволяющая вычислять соответствующие пороговые величины автоматически на основе информации о процессе выявления правил из трассы.

Необходимость в поиске правил, соответствующих автоматам, задаваемым фиксируемыми шаблонами, возникает в связи с тем, что точное распознавание произвольного КА относится к задаче изучения языка и входит в класс NP-полных задач [13]. В рассматриваемых работах для поиска правил применяются шаблонные автоматы с длиной алфавита 2–3 символа. Авторами метода [17] были предложены правила формирования автоматов с произвольным количеством состояний и символов распознаваемого алфавита за счет последовательного объединения «микрпаттернов», выявленных с применением таких шаблонов. Для дополнительного снижения ресурсоемкости могут быть использованы оптимизация процесса распознавания за счет бинарных решающих диаграмм (BDD) и методов символьного анализа [13, 17], а также ограничение множества проверяемых автоматов рамками фиксированного окна событий [6].

С помощью методов данной подгруппы могут быть извлечены только временные свойства, описываемые в виде КА стандартные последовательности вызовов методов, принадлежащих интерфейсу изучаемой библиотеки. При этом необходимо отметить, что в статье [11] было показано, что точное восстановление комплексных спецификаций с применением методов композиции к раздельно выявленным с использованием

конечно-автоматной модели временным свойствам и ограничениям на область допустимых значений переменных функции в общем случае является невозможным. Ограничения на принадлежность методов, вызовы которых описываются с использованием извлекаемых правил, объектам единственного класса отсутствуют.

Все методы [9, 10] (SEKT), [11], составляющие вторую подгруппу, основаны на использовании алгоритма k-tails [9] или его модификации gk-tail [10] (SEKT), [11]. С их применением могут быть получены как временные свойства [9], так и комплексные правила [10] (SEKT), [11], описывающие допустимые варианты использования объектов библиотечных классов в виде КА с произвольным числом состояний и нефиксированными вариантами переходов. Алгоритм gk-tail включает в себя реализацию базового алгоритма k-tail, дополняя ее выводом и анализом ограничений на данные, и может быть представлен в виде следующей последовательности шагов:

1) поиск последовательностей вызовов, отличающихся только значениями связанных с ними данных;

2) извлечение предикатов с применением метода [16], генерирующего правила применения объектов библиотечного класса;

3) формирование искусственного общего начального состояния восстанавливаемого автомата;

4) поиск и объединение состояний, имеющих эквивалентные цепочки из k исходящих переходов (k-future). При этом k является произвольно задаваемой константой, а требования к эквивалентности определяются как необходимость вызова одних и тех же методов или включение цепочки из k вызовов методов одной последовательности в цепочку из k вызовов методов другой, а также наличие взаимного соответствия между предикатами, описывающими эти вызовы (вызовы равной или включающей цепочки также могут быть описаны с использованием более обобщенных предикатов).

К достоинствам методов рассматриваемой подгруппы относятся возможность вывода «истинных» комплексных правил [10] (SEKT), [11], отсутствие необходимости использования шаблонов при распознавании временных свойств, включаемых в их состав, а также отсутствие принципиального ограничения на принадлежность методов объектам разных классов. Наиболее «узким местом» для методов данной группы будет чувствительность к качеству исходных трасс: любая последовательность событий, подаваемая на вход алгоритму, должна быть генерируема с применением восстанавливаемого автомата. В связи с этим применение алгоритма будет давать некорректные результаты в случае работы

с трассами, содержащими случайное множество событий, не принадлежащих одному правилу, а также с зашумленными трассами. В целях уменьшения влияния рассматриваемых факторов могут быть использованы фрагментирование трассы с вычленением сценария использования метода как упорядоченной последовательности вызовов методов, связанных с искомым по данным, и анализ частоты использования того или иного перехода с последующим устранением редко применяемых переходов.

Последнюю подгруппу методов динамического анализа, распознающих правила использования объектов библиотечного класса путем анализа трасс существующих программ, составляют методы, предполагающие использование техник статистического анализа [12, 14]. Ключевым отличием от методов первой подгруппы, в которых применяется «наивный подсчет», является отсутствие распознавания с хранением состояний шаблонного автомата. Методы данной подгруппы позволяют извлекать временные свойства в виде КА [12] или частых последовательностей [14] вызовов методов библиотечных классов произвольной длины. Извлекаемые правила при этом будут описывать стандартные сценарии использования методов библиотеки.

Для поиска правил применяются как более простые статистические методы [12], основанные на подсчете частоты появления экземпляров того или иного паттерна и проверке преодоления соответствующего порогового значения, так и более сложные [14], использующие Apriori-подобные алгоритмы. Реализация первого [12] из указанных подходов предлагает рассматривать паттерн как набор абстрактных «объектов-ролей» и соответствующих им неупорядоченных множеств вызовов методов библиотечных классов в рамках единственного метода клиентской программы. Выбранный вариант определения накладывает жесткие ограничения на точность и выразительность извлекаемых правил. Так, клиентские методы, реализация которых использует более чем одно правило, будут либо отвергнуты при подсчете, либо использованы для извлечения сложных правил (с потерей возможности восстановления потенциально более полезных простых правил, входящих в их состав). Для повышения качества результатов, получаемых с использованием рассматриваемого решения, применяются приведение задействованных объектов к суперклассам (обладающим требуемым интерфейсом), создание единственного искусственного объекта при анализе работы с коллекциями, а также механизм фильтрации рассматриваемых вызовов по принадлежности к конкретным модулям. Выбор же Apriori-подобного алгоритма [14] для поиска правил изначально позволяет обеспечить опре-

деленную устойчивость к шуму во входных трассах, в связи с чем для него подобная предобработка не требуется.

Подводя итог, необходимо отметить, что ввиду причин, аналогичных рассмотренным для подходов, основанных на применении методов статического анализа, проведение сравнения производительности подходов, использующих методы динамического анализа, и качества извлекаемых с их помощью спецификаций является непросто задачей. Так, ряд работ [6, 8, 9, 11, 13, 14] в принципе не содержит информации о точности извлечения, часть работ [7, 15] содержит информацию о качестве правил, полученных в результате отдельных случаев применения средств, реализованных с использованием соответствующих методов, а некоторые авторы вводят свои определения для понятия истинности выведенной спецификации [12, 17].

В целом совокупности рассмотренных методов динамического анализа присущи следующие свойства:

- сравнительно небольшое количество извлекаемых правил;
- разные показатели качества извлекаемых правил;
- использование исходного кода для увеличения точности получаемых результатов.

Среднее количество правил, получаемых с использованием методов динамического анализа, составляет несколько десятков (для сравнения, в случае применения методов статического анализа соответствующее значение может достигать тысяч и миллионов [1]). Это обуславливается использованием рассмотренных механизмов предварительной обработки трасс, а также различных способов фильтрации и композиции найденных правил [7, 17].

Информация о показателях точности результатов, получаемых с использованием методов динамического анализа, представлена в табл. 1–3.

Как видно из табл. 1, для извлечения декларативных спецификаций применяются генеративные методы динамического анализа. Их использование позволяет получать ограничения на значения состояний целевого объекта и параметров вызываемых методов с высокой точностью 92–95 % (для сравнения, точность результирующих спецификаций данного вида, получаемых с применением единственного метода, основанного на статическом анализе, составляет менее 70 % [19]). При этом необходимо отметить, что для подхода [15] оценка показателей качества приведена для результатов анализа весьма незначительного объема кода (10 классов). К недостаткам рассматриваемой группы методов, за исключением общей ограниченности распознаваемых правил шаблонами, можно отнести необходимость их

■ **Таблица 1.** Подходы для извлечения ограничений на значения состояний целевого объекта и параметры вызываемых методов

■ **Table 1.** Approaches to mining of rules containing jointly containing predicates for allowed target object's states and method parameters

| Работа | Элементы моделей | Точность, % |
|--------|--|-------------|
| [15] | Аксиомы, описывающие допустимые диапазоны значений для параметров и результатов вызова методов и последовательностей методов объекта библиотечного класса, фиксируемые с использованием шаблонов | 92 |
| [16] | Предусловия и постусловия для методов и инвариантов для библиотечного класса, фиксируемые с использованием шаблонов | 95 |

■ **Таблица 2.** Подходы для извлечения временных свойств

■ **Table 2.** Approaches to mining of rules containing temporal properties

| Работа | Вид временных свойств | Элементы моделей | Вид статистических методов |
|--------|--|--|---|
| [6] | КА с фиксацией стандартных последовательностей вызовов | 2-буквенные КА, описывающие стандартные последовательности вызовов на объектах библиотечных классов, фиксируемые с использованием шаблонов | Пороговые методы (частота пар, частота пар с учетом статического контекста вызовов) |
| [7] | | | Пороговые методы (частота пар и аномалий) |
| [8] | КА с фиксацией разрешенных и запрещенных последовательностей вызовов методов | Последовательности допустимых (не приводящих к генерации исключения) вызовов методов на объекте библиотечного класса | Не используются |
| [9] | Недетерминированный КА с фиксацией стандартных последовательностей вызовов | КА, описывающие стандартные сценарии использования для задаваемых пользователем искомых методов | Используются в постобработке для удаления редко используемых переходов распознанного КА |
| [12] | Аналогично [6] с указанием частоты вызовов | Аналогично [9]; нельзя зафиксировать разные цепочки, приводящие к вызову одного метода | Пороговые методы (статическая и динамическая частота паттернов) |
| [13] | Аналогично [6] | Аналогично [6], дополнительно поддерживаются 3-буквенные КА | Пороговые (динамическая частота, с допущением на шум) |
| [14] | Частые упорядоченные множества вызовов методов библиотечных классов | Стандартные последовательности вызовов методов на объектах классов произвольной длины, предворяющие вызов фиксированного метода | Семейство методов Apriori |
| [17] | Аналогично [6] | КА, получаемый путем композиции «микропаттернов» [13] | Аналогично [13] |

точной настройки (выбор подмножества), а также ручного ввода описания взаимозависимостей с иными шаблонами для уменьшения количества извлекаемых спецификаций (в случае использования нестандартного шаблона; таков алгоритм работы, например, с широко используемым в индустрии инструментальным средством Daikon, описанным в работе [16]).

Аналогично рассмотренному ранее для подходов, основанных на применении методов ста-

тического анализа, наиболее многочисленное множество составляют подходы, позволяющие извлекать временные свойства (табл. 2).

Ввиду отсутствия результатов систематической оценки качества получаемых спецификаций, произвести сравнительную оценку соответствующих методов возможно лишь качественно. За исключением метода [8], все они позволяют извлекать стандартные, а не допустимые последовательности вызовов, и относятся к группе методов,

- **Таблица 3.** Подходы для извлечения комплексных свойств
- **Table 3.** Approaches to mining of complex rules

| Работа | Вид временных свойств | Элементы моделей | Точность, % |
|------------------------|---|---|-------------|
| [10] (CONTRACTOR++) | КА с фиксацией разрешенных последовательностей вызовов методов на объекте библиотечного класса | Произвольные потенциально допустимые последовательности вызовов методов на объекте библиотечного класса и ограничения на данные | 97 |
| [10] (SEKT) | КА с фиксацией стандартных последовательностей вызовов методов на объектах библиотечных классов, также фиксируются ограничения на параметры методов | Стандартные последовательности вызовов методов на объектах библиотечных классов и ограничения на данные | 100 |
| [10] (TEMI) | Аналогично [10] (CONTRACTOR++), два вида переходов — потенциально возможные и подтвержденные | Аналогично [10] (CONTRACTOR++) | 99 |
| [11] | Аналогично [10] (SEKT) | Аналогично [10] (SEKT) | — |

распознающих правила использования объектов путем анализа трасс программ. При этом принципиальное ограничение на принадлежность вызовов, включаемых в состав правил, объекту конкретного класса отсутствует. Использование метода [8], дающего несколько большую гибкость с точки зрения вида формируемых правил, предполагает необходимость выполнения пользователем ручной работы на нескольких этапах формирования спецификации: выбор предикатов для абстракции внутреннего состояния класса и исключения, относительно которого изучается интерфейс, осуществляется вручную.

Заметная часть подходов [10] (CONTRACTOR++, TEMI), позволяющих извлекать комплексные свойства, которые представлены в табл. 3, также основана на непосредственном применении генеративных методов при исследовании пространства состояний класса, при этом средняя точность результатов, получаемых с их использованием, составляет 97–99 %. Правила аналогичного качества позволяют получать и основанный на восстановлении КА алгоритм [10] (SEKT) (для работы [11] информация о точности сформированных правил не приводится).

Во многом такие значения могут быть объяснены тем, что все обозреваемые подходы используют в процессе своей работы рассмотренное ранее инструментальное средство [16]. Однако, наследуя высокие значения показателей качества получаемых результатов, они наследуют и налагаемые на них ограничения: ограниченность выразительности спецификаций подмножеством шаблонов и необходимость аккуратной ручной работы по осуществлению конфигурирования. Помимо этого, правила, извлекаемые с использованием методов

[10] (CONTRACTOR++, TEMI), [11], ограничены описанием временных свойств для объектов, принадлежащих конкретному классу изучаемого библиотечного API. Для подхода [10] (SEKT) такое ограничение выполняться не будет.

Другим способом увеличения качества результирующих спецификаций является осуществление анализа исходного кода для уточнения контекста поиска правил. Так, в методах динамического анализа [6, 12] частота использования паттернов оценивается с учетом статической информации о количестве уникальных мест вызовов. Также с рассматриваемой целью может быть осуществлена предварительная фильтрация трасс, например, для исключения из рассмотрения правил, содержащих вызовы методов-оберток и вложенных методов [7], или выделения методов, принадлежащих одному пакету [12]. Необходимо отметить, что большинство рассматриваемых методов требует наличия распознаваемой трассы и на момент написания статьи используется только при реализации методов второй группы. Рассмотренные ранее для подходов, относящихся к статическому анализу, алгоритмы предварительной фильтрации, основанные на знании о языке или компонентах (удаление вызовов стандартных функций или цепочек get-методов, используемых для получения значений конкретных полей [20] и др.), на момент написания статьи ни одним из обозреваемых методов не реализуются. Предварительная обработка трасс с использованием метрического покрытия, вычисляемого на основе артефактов процесса разработки [18], применение которой позволяло получить правила с наилучшей точностью, также не поддерживается.

Заключение

Извлечение спецификаций является сравнительно новой областью, и большая часть изученных подходов носит экспериментальный или исследовательский характер, поэтому, помимо показателей качества получаемых результатов (систематические данные о которых, зачастую, отсутствуют), в качестве равных по степени важности критериев рассматривались выразительные возможности модели, поддерживаемой подходом (в границах, заданных формализмом [2]), степень участия пользователя в формировании входных и проверке выходных данных и потенциальная сложность адаптации для поддержки нового вида правил (в связи с этим для наиболее пристального изучения были выбраны комплексные и временные свойства).

Наибольшая часть имеющихся на данный момент решений посвящена формированию временных свойств (поведенческих спецификаций) в виде последовательностей вызовов с использованием как методов статического (рассмотренных ранее в работе [1]), так и динамического [6–9, 12–14, 17] анализа. Рассмотренные методы позволяют извлекать правила как с применением шаблонов, так и без, однако с их использованием можно захватывать только стандартные (частые) последовательности вызовов (за исключением метода [8]). Точность результатов, получаемых с использованием методов динамического анализа, будет варьироваться от 18 до 60 %, однако необходимо отметить, что в заметном количестве работ для оценки используются оригинальные критерии, разработанные авторами исследований, что делает их сравнение малоинформативным.

Существенно меньшее количество подходов позволяет захватывать правила с использованием наиболее выразительных комплексных мо-

делей [10] (SEKT, CONTRACTOR++, ТЕМ), [11]. Как статические, так и динамические подходы позволяют захватывать комплексные правила в свободной форме. Для большинства методов, базирующихся на динамическом анализе [10] (SEKT, CONTRACTOR++, ТЕМ), значение точности результирующих спецификаций будет составлять 97–100 %. Наиболее точные разрешающие комплексные спецификации (обладающие качеством более 90 %) могут быть получены с использованием генеративных методов динамического анализа. При этом следует подчеркнуть, что методы подходов, позволяющих достичь таких результатов, генерируют правила, используя в качестве входа предикаты, описывающие ограничения на данные, которые также были извлечены с использованием генеративных методов. К ограничениям рассматриваемых подходов относятся невозможность восстановления с их использованием спецификаций, описывающих взаимодействие нескольких объектов (что позволяет сделать подход [3], основанный на использовании методов статического анализа), изменение состояния библиотеки и семантику вызовов, а также использование шаблонов.

Таким образом, по результатам проведенного обзора, с точки зрения выразительности и качества получаемых правил, а также степени вовлеченности пользователя, наиболее целесообразным в контексте разработки подхода извлечения поведенческих правил использования элементов библиотечного API с применением комплексной модели, предложенной в работе [2], является разработка генеративных методов динамического анализа, основанных на внешних инструментах (например, [16]) для извлечения ограничений на данные.

Работа частично поддержана стипендиальной программой компании «Сименс» в СПбПУ.

Литература

- Егорова И. С., Ицыксон В. М. Обзор статических методов восстановления частичных спецификаций программных библиотек на основе анализа программных проектов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6. С. 66–75. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.66
- Ицыксон В. М. Формализм и языковые инструменты для описания семантики программных библиотек // Моделирование и анализ информационных систем. 2016. № 23. С. 754–766.
- Ramanathan M., Grama A., Jaganathan S. Static Inference with Predicate Mining // Proc. of the 28th ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation. 2007. P. 123–134.
- Wasykowski A., Zeller A. Mining Temporal Specifications from Object Usage // Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering. 2009. P. 295–306.
- Nguyen T. T., Nguyen H. A., Pham N. H., Al-Kofahi J. M., Nguyen T. N. Graph-based Mining of Multiple Object Usage Patterns // Proc. of the 7th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering. 2009. P. 383–392.
- Gabel M., Su Z. Online Inference and Enforcement of Temporal Properties // Proc. of the 32nd ACM/IEEE Intern. Conf. on Software Engineering. 2010. Vol. 1. P. 15–24.
- Yang J., Evans D., Bhardwaj D., Bhat T., Das M. Peracotta: Mining Temporal API Rules from Imperfect

- Traces // Proc. of the 28th Intern. Conf. on Software Engineering. 2006. P. 282–291.
8. Alur R., Cerny P., Madhusudan P., Nam W. Synthesis of Interface Specifications for Java Classes // Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages. 2005. P. 98–109.
 9. Ammons G., Bodik R., Larus J. R. Mining Specifications // Proc. of the 29th ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages. 2002. P. 4–16.
 10. Krka I., Medvidovic N., Brun Y. Automatic Mining of Specifications from Invocation Traces and Method Invariants // Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering. 2014. P. 178–189.
 11. Lorenzoli D., Mariani L., Pezze M. Automatic Generation of Software Behavioral Models // Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering. 2008. P. 501–510.
 12. Pradel M., Gross T. L. Automatic Generation of Object Usage Specifications from Large Method Traces // Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering. 2009. P. 371–382.
 13. Gabel M., Su Z. Symbolic Mining of Temporal Specifications // Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering. 2008. P. 51–60.
 14. Lo D., Khoo S., Liu C. Mining Past-Time Temporal Rules from Execution Traces // Proc. of the 2008 Intern. Workshop on Dynamic Analysis: Held in Conjunction with the ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Software Testing and Analysis (ISSTA 2008). 2008. P. 50–56.
 15. Henkel J., Diwan A. Discovering Algebraic Specifications from Java Classes // Proc. of the 17th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2003, Darmstadt, Germany, July 21–25, 2003. Lecture Notes in Computer Science, 2003. Vol. 2743. P. 431–456.
 16. Ernst M. D., Perkins J. H., Guo P. J., McCamant S., Pacheco C., Tschantz M. S., Xiao C. The Daikon System for Dynamic Detection of Likely Invariants // Science of Computer Programming. 2007. Vol. 69. Iss. 1–3. P. 35–45.
 17. Gabel M., Su Z. Javert: Fully Automatic Mining of General Temporal Properties from Dynamic Traces // Proc. of the 16th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering. 2008. P. 339–349.
 18. Goues C., Weimer W. Specification Mining with Few False Positives // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: Held as Part of the Joint European Conf. on Theory and Practice of Software. 2009. P. 292–306.
 19. Thummalapenta S., Xie T. Alattin: Mining Alternative Patterns for Defect Detection // Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering. 2009. P. 293–323.
 20. Livshits B., Zimmerman T. DynaMine: Finding Common Error Patterns by Mining Software Revision Histories // Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering. 2005. P. 296–305.

UDC 004.4'2

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.67

Review of Dynamic Methods for Extraction of Partial Software Library SpecificationEgorova I. S.^a, Post-Graduate Student, is.egorova@mail.ruItsykson V. M.^a, PhD, Tech., Associate Professor, vlad@icc.spbstu.ru^aPeter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Nowadays, software development is commonly based on the reuse of previously created components united into software libraries and frameworks. Such third-party components often come without full and precise documentation. Specification recovery can be performed by the analysis of successfully developed open-source projects. **Purpose:** Analysis and classification of the most prospective approaches to automated extraction of software library specifications based on the methods of dynamic code analysis. **Results:** Various approaches used to describe library components have been reviewed and compared. We have discussed the ways of deriving specifications using dynamic analysis methods. It is found out that the most exact dynamic analysis approaches are based on algorithms which generate and check template hypotheses. Their main restrictions are the lack of possibility to specify interaction between several objects and changes in the library state, and also the usage of templates. Besides, it should be noted that no one of the reviewed approaches currently supports the recovery of semantic description of library method calls.

Keywords — Software Library Specification, Formal Specification, Dynamic Extraction of Specifications, Extended Finite State Automata, Temporal Properties, Behavioral Software Library Model, Complex Rules, Dynamic Analysis.

Citation: Egorova I. S., Itsykson V. M. Review of Dynamic Methods for Extraction of Partial Software Library Specification. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 67–75 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.67

References

1. Egorova I. S., Itsykson V. M. Survey of Static Methods for Partial Software Library Specification Extraction. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 66–75 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.66
2. Itsykson V. M. The Formalism and Language Tools for Semantics Specification of Software Libraries. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem* [Modeling and Analysis of Information Systems], 2016, no. 23, pp. 754–766 (In Russian).
3. Ramanathan M., Grama A., Jaganathan S. Static Inference with Predicate Mining. *Proc. of the 28th ACM SIGPLAN Conf. on Programming Language Design and Implementation*, 2007, pp. 123–134.
4. Wasylkowski A., Zeller A. Mining Temporal Specifications from Object Usage. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 295–306.
5. Nguyen T. T., Nguyen H. A., Pham N. H., Al-Kofahi J. M., Nguyen T. N. Graph-based Mining of Multiple Object Usage Patterns. *Proc. of the 7th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering*, 2009, pp. 383–392.
6. Gabel M., Su Z. Online Inference and Enforcement of Temporal Properties. *Proc. of the 32nd ACM/IEEE Intern. Conf. on Software Engineering*, 2010, vol. 1, pp. 15–24.
7. Yang J., Evans D., Bhardwaj D., Bhat T., Das M. Perracotta: Mining Temporal API Rules from Imperfect Traces. *Proc. of the 28th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2006, pp. 282–291.
8. Alur R., Cerny P., Madhusudan P., Nam W. Synthesis of Interface Specifications for Java Classes. *Proc. of the 32nd ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages*, 2005, pp. 98–109.
9. Ammons G., Bodik R., Larus J. R. Mining Specifications. *Proc. of the 29th ACM SIGPLAN-SIGACT Symp. on Principles of Programming Languages*, 2002, pp. 4–16.
10. Krka I., Medvidovic N., Brun Y. Automatic Mining of Specifications from Invocation Traces and Method Invariants. *Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2014, pp. 178–189.
11. Lorenzoli D., Mariani L., Pezze M. Automatic Generation of Software Behavioral Models. *Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2008, pp. 501–510.
12. Pradel M., Gross T. L. Automatic Generation of Object Usage Specifications from Large Method Traces. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 371–382.
13. Gabel M., Su Z. Symbolic Mining of Temporal Specifications. *Proc. of the 30th Intern. Conf. on Software Engineering*, 2008, pp. 51–60.
14. Lo D., Khoo S., Liu C. Mining Past-Time Temporal Rules from Execution Traces. *Proc. of the 2008 Intern. Workshop on Dynamic Analysis: Held in Conjunction with the ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Software Testing and Analysis (ISSTA 2008)*, 2008, pp. 50–56.
15. Henkel J., Diwan A. Discovering Algebraic Specifications from Java Classes. *Proc. of the 17th European Conf. on Object-Oriented Programming, ECOOP 2003*, Darmstadt, Germany, July 21–25, 2003, Lecture Notes in Computer Science, 2003, vol. 2743, pp. 431–456.
16. Ernst M. D., Perkins J. H., Guo P. J., McCamant S., Pacheco C., Tschantz M. S., Xiao C. The Daikon System for Dynamic Detection of Likely Invariants. *Science of Computer Programming*, 2007, vol. 69, iss. 1–3, pp. 35–45.
17. Gabel M., Su Z. Javert: Fully Automatic Mining of General Temporal Properties from Dynamic Traces. *Proc. of the 16th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2008, pp. 339–349.
18. Goues C., Weimer W. Specification Mining with Few False Positives. *Proc. of the 15th Intern. Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: Held as Part of the Joint European Conf. on Theory and Practice of Software*, 2009, pp. 292–306.
19. Thummalapenta S., Xie T. Alattin: Mining Alternative Patterns for Defect Detection. *Proc. of the 2009 IEEE/ACM Intern. Conf. on Automated Software Engineering*, 2009, pp. 293–323.
20. Livshits B., Zimmerman T. DynaMine: Finding Common Error Patterns by Mining Software Revision Histories. *Proc. of the 10th European Software Engineering Conf. Held Jointly with 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering*, 2005, pp. 296–305.

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Д. В. Юркин^а, канд. техн. наук, доцент, dvyurkin@yandex.ru

А. А. Уткина^а, магистрант, alena_utkina_95@mail.ru

А. О. Первушин^б, магистрант, aeksei94@gmail.com

^аСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Большевикова пр., 22-1, Санкт-Петербург, 193232, РФ

^бСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

Введение: для уменьшения времени доступа к защищенному каналу связи разработчики телекоммуникационных систем всегда стремятся улучшить алгоритмическую реализацию протоколов аутентификации. При этом наряду с временными характеристиками всегда необходимо получать оценки защищенности, эффективности и надежности криптографических протоколов, что обеспечивается методами формализованного анализа. **Цель:** поиск типовых уязвимостей, наличие которых может скомпрометировать процесс аутентификации. **Методы:** на основе предикатов и постулатов формализованной логики проведен анализ протокола аутентификации Никитина — Юркина, использующего бесключевые хеш-функции. **Результаты:** по результатам анализа, проведенного с помощью механизмов ВАН-логики, в исследуемом протоколе выявлены недостатки, которые накладывают ограничения на область его применения, а именно: отсутствие знания о свежести сообщения от центра распределения ключей у участников процесса аутентификации, а также невозможность использовать данный протокол для того, чтобы уникально идентифицировать трех и более участников. Приведена модификация исходного протокола аутентификации, в результате которой выявленные ограничения его применения были нивелированы. Сформулированы обоснованные выводы, что данные исследования являются эффективным и востребованным способом описания криптографических протоколов в силу того, что, пользуясь им, можно определить, какие действия выполняет тот или иной протокол, а также выявить его типовые недостатки. **Практическая значимость:** результаты исследований позволяют повысить безопасность существующих распределенных сетей радиодоступа.

Ключевые слова — аутентификация, уязвимости протоколов аутентификации, бесключевые хеш-функции, ВАН-логика, логика аутентификации.

Цитирование: Юркин Д. В., Уткина А. А., Первушин А. О. Формализованный анализ протоколов аутентификации // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 76–83. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.76

Citation: Yurkin D. V., Utkina A. A., Pervushin A. O. Formalized Analysis of Authentication Protocols. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 76–83 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.76

Введение

В настоящее время в зависимости от различных требований к автоматизированным системам в защищенном исполнении средства защиты информации используют большое множество различных криптографических протоколов аутентификации [1, 2]. Высокой актуальностью обладает вопрос поиска уязвимостей в системах управления доступом к защищаемым информационным ресурсам, по причине чего возникает необходимость формализованного анализа самой модели работы криптографического протокола методами, инвариантными к его алгоритмической и программной реализации [3]. Нередко в области стандартизации и сертификации требуется формально изложить работу различных криптографических протоколов, чтобы понять и оценить, в какой степени они достигают нужных результатов, а также выявить их недостатки [4].

В данной статье рассмотрено применение аппарата логики формализованного анализа про-

токолов аутентификации — ВАН-логики. С помощью механизмов формализованной логики проанализирован протокол аутентификации с использованием бесключевых хеш-функций с целью выявить в нем недостатки в различных схемах функционирования.

ВАН-логика — это формализованный метод анализа криптографических протоколов, по результатам применения которого может быть получен резюмирующий ответ на ряд вопросов, например:

— какие фактические задачи выполняет этот протокол;

— присутствуют ли в этом протоколе избыточные действия, которые можно не выполнять без снижения защищенности;

— обеспечивает ли должную конфиденциальность передаваемых данных этот протокол, и могут ли скомпрометировать отправленные в открытом явном виде данные ход его работы [5–9].

Важнейшей целью разработки метода является объяснение основных концепций при провер-

ке подлинности, так как VAN-логика большей частью построена на парадигме доверия [10–12].

Основные предикаты и их обозначения

Протоколы аутентификации, как правило, описываются формализованным перечислением сообщений, передаваемых между участниками (корреспондентами), при этом указываются отправитель, получатель и содержимое каждого сообщения [10, 13–15]. Обычные неформально-описательные обозначения неудобны для операций в формализованной логике, так как на стадии описания требуется однозначное указание предопределенных значений полей каждой части каждого сообщения, и эти значения не всегда очевидно следуют из данных, содержащихся непосредственно в самих сообщениях. Для того чтобы ввести точное обозначение и обеспечить однозначное соответствие оригинальному описанию протокола, каждое сообщение преобразуется в логическую формулу, и эта логическая формула является модифицированной версией исходного описания сообщения. После чего логические формулы связываются утверждениями [15, 16].

VAN-логика оперирует несколькими видами объектов, таких как участники (корреспонденты), ключи шифрования и формулы (утверждения). Сообщения протокола идентифицируются как утверждения. Идентификаторы A , B и S ассоциируются с участниками; идентификаторы K_{ab} , K_{as} и K_{bs} обозначают парные ключи для симметричных криптографических методов; K_a , K_b и K_s — открытые ключи; K_a^{-1} , K_b^{-1} и K_s^{-1} — секретные ключи для криптографических преобразований с открытым ключом, а N_a , N_b и N_c обозначают утверждения [11, 17, 18].

Единственной логической операцией, применяемой в данном математическом аппарате, является конъюнкция, которая обозначается запятой. Также применимы такие свойства конъюнкции, как ассоциативность и коммутативность. Аппаратом, помимо логической операции, используется следующая конструкция:

1) $A \models X$ — корреспондент A верит в высказывание X ;

2) $A \triangleleft X$ — корреспондент A видит высказывание X ;

3) $A \sim X$ — корреспондент A в определенное время отправил сообщение, содержащее X ;

4) $A \mid \Rightarrow X$ — корреспондент A обладает юрисдикцией над X , т. е. участник A обладает авторитетом по высказыванию X ;

5) $\#X$ — высказывание X является свежим, т. е. X не было отправлено в сообщении ранее до момента текущего выполнения итерации протокола;

6) $key(K, A \leftrightarrow B)$ — корреспонденты A и B могут использовать общий ключ K для взаимодействия, который никогда не может быть получен какими-либо другими корреспондентами, помимо A или B , или доверенными корреспондентами от A или B ;

7) $\{X\}_K$ подразумевает, что данные X зашифрованы ключом K ;

8) $Eq(h_1, h_2)$ — сравнение значений хеш-функций; истинно только тогда, когда h_1 полностью совпадает с h_2 [19].

Логические постулаты

Перед описанием логических постулатов необходимо отметить нижеприведенные положения VAN-логики.

В процессе аутентификации существует два условных временных интервала: прошлое и настоящее. Настоящий временной интервал начинается с момента выполнения рассматриваемого протокола. Все сообщения, отправленные до времени выполнения протокола, попадают в интервал прошлого [1, 20].

Все убеждения, принятые в настоящее время, являются действительными на протяжении всей работы протокола. Кроме того, предполагается, что когда участник A высказывает X , то он априори верит в истинность X .

Зашифрованное сообщение представляется как связанное логическое утверждение, зашифрованное ключом шифрования. Предполагается, что шифрование выполняется таким образом, что обрабатывается сразу все сообщение. Если в одно сообщение включены две части одного и того же исходного сообщения, зашифрованные отдельно, то считается, что обе части пришли в разных сообщениях.

Ниже приведено описание логических постулатов.

1. Правило назначения сообщения объясняет, как получить представление о происхождении сообщений.

Правило для общих ключей выглядит следующим образом:

$$\frac{A \models key(K, A \leftrightarrow B), A \triangleleft \{X\}_K}{A \models B \sim X} \quad (1)$$

Если корреспондент A считает, что у него есть общий ключ K с корреспондентом B , и A видит сообщение X , зашифрованное на ключе K , то A верит в то, что B высказал X .

2. Правило проверки уникальности меток

$$\frac{A \models \#X, A \models B \sim X}{A \models B \models X} \quad (2)$$

То есть, если корреспондент A полагает, что сообщение X было высказано недавно и что корреспондент B однажды высказал X , то A считает, что B верит в X .

3. Правило юрисдикции

$$\frac{A \models B \Rightarrow X, A \models B \models X}{A \models X} \quad (3)$$

Правило говорит о том, что если корреспондент A считает, что корреспондент B имеет юрисдикцию над X , и A верит тому, что B верит в истину X , то A верит в истину X .

С учетом вышеописанных постулатов строится система доказательств. Формула X выводима из формулы Y , если существует последовательность формул $Z_0; \dots; Z_n$, где $Z_0 = Y$, $Z_n = X$ и каждая Z_{i+1} может быть получена из предыдущих путем применения вышеописанных правил [1].

Протокол аутентификации с использованием бесключевых хеш-функций

Рассмотрим в данной работе протокол аутентификации с использованием бесключевых хеш-функций, который был разработан В. Н. Никитиным и Д. В. Юркиным. Данный протокол предусматривает двухстороннюю аутентификацию корреспондентов путем передачи всего двух сообщений. Для однонаправленного преобразования информации используются бесключевые хеш-функции, а общий секрет используется в качестве входной переменной хеш-функции [21].

В данном протоколе A и B являются корреспондентами; S — центр распределения ключей; $H(X) = h$, где $H(X)$ — функция хеширования; X — некое высказывание; h — отображение высказывания X ; \parallel — операция конкатенации строк [20, 21].

До начала работы протокола доверенная сторона (центр распределения ключей) генерирует случайную секретную последовательность K_{ab} , на основании которой корреспонденты аутентифицируют друг друга. По защищенному каналу осуществляется передача секретной последовательности обеим сторонам:

$$1) S \rightarrow A : \{K_{ab}\}_{K_{as}};$$

$$S \rightarrow B : \{K_{ab}\}_{K_{bs}}.$$

Корреспонденты A и B принимают общий секрет K_{ab} от центра распределения ключей.

После предварительных вычислений и распределения общего секрета следует активная часть протокола. Сначала корреспондент A , который является инициатором, генерирует случайное число C . Далее корреспондент A вычисляет бесключевую хеш-функцию случайного числа C , конкатениро-

ванного с общим секретом: $h_S = h(K_{ab} \parallel C)$, а также хеш-функцию предыдущей хеш-функции $h(x)$ случайного числа и общего секрета $h_S = H(K_{ab} \parallel C)$, конкатенированной со значением общего секрета: $h_R = H(h_S \parallel K_{ab}) = H(K_{ab} \parallel h_S(K_{ab} \parallel C))$. После того как корреспондент A выполнил все вычисления, он отправляет корреспонденту B сообщение, содержащее случайное число C и значение бесключевой хеш-функции h_R :

$$2) A \rightarrow B : C, h_R.$$

Корреспондент B принимает сообщение (C, h_R) от корреспондента A и далее производит вычисления значения хеш-функции h_S от случайного числа C , принятого от инициатора, и общего секрета K_{ab} : $h_S = H(K_{ab} \parallel C)$. На основе этого вычисленного значения он вычисляет h_R как значение бесключевой хеш-функции предыдущей хеш-функции случайного числа и общего секрета $h_S = H(K_{ab} \parallel C)$, конкатенированной с общим секретом:

$$\bar{h}_R = H(K_{ab} \parallel \bar{h}_S) = H(K_{ab} \parallel H(K_{ab} \parallel C)).$$

После выполнения вычислений корреспондент B сравнивает полученное значение \bar{h}_R и принятое от корреспондента A значение h_R . Если эти значения совпадают, то это значит, что A



- Выполнение корреспондентами протокола двусторонней аутентификации
- Execution of the protocol of reciprocal authentication by correspondents

успешно аутентифицирован, и корреспондент B отправляет корреспонденту A

$$3) B \rightarrow A : \bar{h}_S.$$

Далее корреспондент A принимает отправленное корреспондентом B значение \bar{h}_S и сравнивает его со значением бесключевой хеш-функции, вычисленной им ранее: $h_S = \bar{h}_S$. Если значения этих хеш-функций совпадают, то протокол завершен успешно [21].

Схема работы протокола представлена на рисунке.

В результате после идеализации протокола шаги его работы выглядят следующим образом:

- 1) $S \rightarrow A : \{ key(K_{ab}, A \leftrightarrow B) \}_{K_{as}}$;
- 2) $S \rightarrow A : \{ key(K_{ab}, A \leftrightarrow B) \}_{K_{as}}$;
- 3) $A \rightarrow B : C, h_R = H(K_{ab} \| h_S(K_{ab} \| C))$;
- 4) $B \rightarrow A : \bar{h}_S = H(K_{ab} \| C)$.

На основании приведенного формального описания получен идеализированный протокол двусторонней аутентификации.

Анализ протокола аутентификации с использованием бесключевых хеш-функций

Запишем цели протокола аутентификации в терминах ВАН-логики, т. е. укажем, какие логические утверждения должны быть выведены из предположений протокола с учетом последовательности шагов, выполняемых в данном протоколе [8, 15, 16]. Таким образом, аутентификация корреспондентов A и B считается выполненной, если существует такое K , что:

$$A \models key(K, A \leftrightarrow B) = A \models K_{ab};$$

$$B \models key(K, A \leftrightarrow B) = B \models K_{ab}.$$

Или, сказав иначе, оба корреспондента A и B должны поверить в то, что они используют для обмена сообщениями один и тот же секретный ключ K_{ab} . Однако для анализируемого протокола требуется большее:

$$A \models B \models key(K, A \leftrightarrow B) = A \models B \models K_{ab};$$

$$B \models A \models key(K, A \leftrightarrow B) = B \models A \models K_{ab}.$$

Таким образом, можно сказать, что каждый корреспондент должен верить в то, что другой корреспондент верит в то, что для обмена сообщениями они используют один и тот же секретный ключ K_{ab} [1].

Для того чтобы гарантировать успешное выполнение протокола, необходимо сделать начальные предположения:

$$1) A \models key(K_{as}, A \leftrightarrow S); B \models key(K_{bs}, B \leftrightarrow S); S \models key(K_{as}, A \leftrightarrow S); S \models key(K_{bs}, B \leftrightarrow S);$$

$$2) S \models key(K_{ab}, A \leftrightarrow B);$$

$$3) A \models (S \models key(K, A \leftrightarrow B)); B \models (S \models key(K, A \leftrightarrow B));$$

$$4) A \models \#C;$$

$$5) A \models \#key(K, A \leftrightarrow B); B \models \#key(K, A \leftrightarrow B).$$

В первой группе выведены четыре формулы, обозначающие общие ключи для взаимодействия между клиентами A и B и сервером S . Формула $S \models key(K_{ab}, A \leftrightarrow B)$ означает, что сервер изначально знает ключ, который должен стать общим секретом между A и B .

Третья группа из двух формул указывает на то, что корреспонденты A и B полагаются на S при генерации криптографического ключа.

Предположение $A \models \#C$ указывает на то, что корреспондент A сгенерировал случайное число C и верит в его свежесть.

Последние два предположения в пятой группе кажутся необычными, но в дальнейшем анализе протокола будет показано, зачем они необходимы.

Перейдем непосредственно к анализу протокола аутентификации.

Предварительные вычисления.

1. Корреспондент A получает по защищенному каналу первое сообщение от центра распределения ключей S , на основе которого можно сделать следующий вывод:

$A \triangleleft \{K_{ab}\}_{K_{bs}}$ — A видит сообщение, зашифрованное ключом K_{as} , и делает вывод, что оно было послано S (1).

Однако A не может продолжать выполнять протокол, так как невозможно сделать вывод о том, что A поверил в полученный от S ключ по следующим причинам:

1) в тот момент, когда S отправляет сообщение A , то A не может знать, в какой момент времени это сообщение было отправлено. Так как вера в свежесть сообщения является необходимым условием в правиле проверки уникальности числовых вставок (2), следовательно, невозможно сделать вывод о том, что центр распределения ключей верит в отправленное им сообщение;

2) вследствие того, что невозможно точно утверждать, что S верит в посланное им сообщение, нельзя сделать вывод о том, что A поверил в принятый им ключ для обмена сообщениями с корреспондентом B от S на основе правила юрисдикции (3).

Поэтому A предполагает, что сообщение от S является новым.

Если делается необходимое предположение о том, что S является доверенным источником и канал связи с ним обладает гарантированной имитозащитой, то вся остальная активная

часть протокола формализуется. Получается $A \models \equiv key(K_{ab}, A \leftrightarrow B)$ с помощью (2) и (3).

2. Корреспондент B получает по защищенному каналу первое сообщение от центра распределения ключей S , на основе которого можно сделать следующий вывод:

$B \triangleleft \{K_{ab}\}_{K_{bs}}$ — B видит сообщение, зашифрованное ключом K_{bs} , и делает вывод, что оно было послано S (1).

Так же, как и в случае с корреспондентом A , невозможно сделать вывод о том, что B поверил в полученный от S ключ по аналогичным причинам. Следовательно, B просто предполагает, что сообщение от S является новым. Сразу получается, что $B \models key(K_{ab}, A \leftrightarrow B)$ с помощью (2) и (3).

Активные вычисления.

1. $A \models \#C$.

Корреспондент A генерирует случайное число C , следовательно, он верит в его свежесть.

2.
$$\frac{A \models K_{ab}, A \triangleleft C, h_S = H(K_{ab} \| C)}{A \models h_S}$$

Корреспондент A верит в общий ключ для обмена сообщениями с B и видит сгенерированное им случайное число C . На основе этих значений он генерирует хеш $h_S = H(K_{ab} \| C)$, в который он верит.

3.
$$\frac{A \models K_{ab}, A \triangleleft h_S, h_R = H(K_{ab} \| h_S)}{A \models h_R}$$

A верит в общий с B секрет и видит сгенерированный им хеш h_S . На основе этих значений он вычисляет новый хеш $h_R = H(K_{ab} \| h_S)$, в который он верит.

4. $A \rightarrow B : \{C, h_R\}$.

Корреспондент A отправляет B сообщение, которое содержит в себе сгенерированное им случайное число C и вычисленный им хеш h_R .

5. $B \triangleleft \{C, h_R\}$.

Корреспондент B видит полученное от корреспондента A сообщение, содержащее случайное число C и хеш h_R .

6.
$$\frac{B \models K_{ab}, B \triangleleft C, \bar{h}_S = H(K_{ab} \| C)}{B \models \bar{h}_S}$$

B верит в общий с корреспондентом A секрет и видит случайное число C . На основе этих значений он вычисляет хеш \bar{h}_S , в который он верит.

7.
$$\frac{B \models K_{ab}, B \triangleleft \bar{h}_S, \bar{h}_R = H(K_{ab} \| \bar{h}_S)}{B \models \bar{h}_R}$$

Корреспондент B верит в общий с A секрет, видит сгенерированный хеш \bar{h}_S . На основе этих значений он вычисляет хеш \bar{h}_R , в который он верит.

8.
$$\frac{B \triangleleft Eq(h_R, \bar{h}_R)}{B \models A \sim h_R}$$

Корреспондент B сравнивает хеш h_R , полученный от A , и хеш \bar{h}_R , сгенерированный им самим. Если они равны, то B может сделать вывод о том, что A когда-то мог сгенерировать такой хеш.

9.
$$\frac{B \models A \sim h_R, B \models \#(C)}{B \models A \models h_R}$$

Если B не получал прежде числовую метку C , то он верит, что метка свежая. A это значит, что хеш h_R не мог быть передан повторно и никто, кроме корреспондента A , не мог сгенерировать такой хеш. Следовательно, основываясь на том, что B верит в то, что A когда-то послал значение h_R , и том, что B верит в свежесть числовой метки C , можно сделать вывод о том, что B верит в то, что A верит в сгенерированный им хеш h_R (2).

10.
$$\frac{B \models A \models h_R}{B \models A \models K_{ab}}$$

Поскольку хеш h_R является отображением секрета K_{ab} , следует считать K_{ab} и h_R эквивалентными. Следовательно, B верит, что A верит в то, что для обмена сообщениями они используют один и тот же секретный ключ K_{ab} .

11. $B \rightarrow A : \{\bar{h}_S\}$.

Корреспондент B отправляет A сообщение, содержащее вычисленный B хеш $\bar{h}_S = H(K_{ab} \| C)$.

12. $A \triangleleft \{\bar{h}_S\}$.

Корреспондент A видит полученное от B сообщение, содержащее вычисленный B хеш \bar{h}_S .

13.
$$\frac{A \triangleleft Eq(h_S, \bar{h}_S)}{A \models B \sim \bar{h}_S}$$

Корреспондент A сравнивает хеш \bar{h}_S , полученный от B , и h_S , сгенерированный им самим. Если они равны, то A делает вывод, что B когда-то мог сгенерировать такой хеш.

14.
$$\frac{A \models B \sim \bar{h}_S, A \models \#(C)}{A \models B \sim \bar{h}_S}$$

Корреспондент A верит, что числовая метка является свежей. A это значит, что хеш \bar{h}_S не мог быть сгенерирован ранее и никто, кроме B , не мог сгенерировать такой хеш. Следовательно, основываясь на том, что A верит в то, что B когда-то послал значение \bar{h}_S , и том, что A верит в свежесть числовой метки C , можно сделать вывод о том, что A верит в то, что B верит в сгенерированный им хеш \bar{h}_S (2).

15.
$$\frac{A \models B \models \bar{h}_S}{A \models B \models K_{ab}}$$

Поскольку хеш \bar{h}_S является отображением секрета K_{ab} , следует считать K_{ab} и \bar{h}_S эквивалентными. Следовательно, A верит, что B верит, что для обмена сообщениями они используют один и тот же секретный ключ K_{ab} .

В ходе анализа не было выявлено избыточных шагов, после исключения которых корреспонденты все равно смогли бы однозначно аутентифицировать друг друга. В работе протокола было выявлено два недостатка:

1) при получении общего ключа от центра распределения ключей оба корреспондента не могут точно знать, в какое время было отправлено сообщение, содержащее ключ; знание о свежести сообщения является необходимым условием для дальнейшей работы протокола аутентификации;

2) данный протокол аутентификации не может быть использован для того, чтобы уникально идентифицировать трех и более корреспондентов, среди которых распределен общий секрет, так как невозможно однозначно определить, кем именно был послан сгенерированный хеш, поскольку каждый из участников мог его сгенерировать.

Для исключения первого недостатка было принято решение дополнить первое сообщение от центра распределения ключей, в котором содержится общий ключ для корреспондентов A и B , временной меткой. В результате шаги протокола будут выглядеть следующим образом:

- 1) $S \rightarrow A: \{T_S, L, K_{ab}\}_{K_{as}}$; $S \rightarrow B: \{K_{ab}\}_{K_{bs}}$;
- 2) $A \rightarrow B: C, h_R$;
- 3) $B \rightarrow A: \tilde{h}_S$,

где T_S — временная метка, а L — время жизни.

Благодаря наличию временной метки оба корреспондента, принимая первое сообщение от центра распределения ключей, могут убедиться в его свежести [15, 19]. На основе правила проверки уникальности числовых вставок оба корреспондента могут поверить в то, что центр распределения ключей верит в отправленное им сообщение. Далее все действия протокола будут происходить без каких-либо проблем.

Заключение

Исследования криптографических протоколов с использованием VAN-логики являются надежным доказательным способом анализа и описания. При использовании формализованного анализа можно определить, какие действия выполняет тот или иной протокол, а также выявить его типовые недостатки. Необходимо отметить, что по причине работы изложенных методов на заданном уровне абстракции не рассматриваются такие аспекты специфики реализации протоколов, как, например, стойкость используемых криптосистем.

Также было отмечено, что, несмотря на допущение возможности существования злоумышленников, данный метод концентрируется исключительно на доверии надежных сторон, которые участвуют в процессе аутентификации.

В работе был произведен анализ протокола аутентификации с использованием бесключевых хеш-функций с помощью VAN-логики. При анализе не выявлено избыточных шагов, без которых процесс аутентификации выполнялся бы успешно. Однако определено два существенных недостатка, один из которых был успешно устранен путем добавления временной метки в первое сообщение от центра распределения ключей.

Протокол предоставляет достаточно быструю и надежную аутентификацию субъектов, поскольку в нем выполняется передача только двух сообщений, а также используются бесключевые хеш-функции для преобразования информации, что не требует дополнительных операций генерации и смены сеансового ключа, как в случае использования ключевой хеш-функции. Однако данный способ аутентификации требует некоторой доработки для возможности аутентификации трех и более корреспондентов.

Литература

1. Burrows M., Abadi M., Needham R. M. A Logic of Authentication // Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1989. Vol. 426. Iss. 1871. P. 233–271. doi:10.1098/rspa.1989.0125
2. Chatzieftheriou G., Bonakdarpour B., Katsaros P., Smolka S. Abstract Model Repair // Logical Methods in Computer Science. 2015. Vol. 11. P. 1–43.
3. Марков А. С., Рауткин Ю. В., Фадин А. А. Состояние и перспективы анализа защищенности Wi-Fi сетей // Тр. Научно-исследовательского института радио. 2012. № 1. С. 85–90.
4. Hongda Yin, Guanling Chen, Jie Wang. Detecting Protected Layer-3 Rogue APs. Broadband Communications // Networks Broadband Communications: Networks and Systems, Raleigh. 2007. P. 449–458.
5. Watkins L., Robinson W. H., Beyah R. A. A Passive Approach to Rogue Access Point Detection // Global Telecommunications Conf., Washington. 2007. P. 355–360.
6. Chong E., Loo M., Christopher L., Marimuthu P. Intrusion Detection for Routing Attacks in Sensor Networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2006. Vol. 2. N 1. P. 313–332.
7. Chung-Hsin L., Po-Cheng T., Chun-Lin L., Kuo-Hao L. The Study of the Wireless Network Dos Attack // Information Technology, Culture and Human: Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Interaction Sciences. N. Y., 2009. P. 418–421.
8. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 1: Introduction and General Model, Version 3.1 // Common Criteria Portal. 2006. <http://www.commoncriteriaportal.org/files/>

- ccfiles/CCPART1V3.1R3.pdf (дата обращения: 20.10.2013).
9. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 2: Security Functional Requirements, Version 3.1 // Common Criteria Portal. 2006. <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART2V3.1R3.pdf> (дата обращения: 20.10.2013).
 10. Wagatsuma K., Harada T., Anze S., Goto Y. Formalization for Formal Analysis of Cryptographic Protocols with Reasoning Approach // *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: Future Information Technology*. Springer, 2015. P. 25–32.
 11. Косачев А. С., Пономаренко В. Н. Анализ подходов к верификации функций безопасности и мобильности. — М.: Триумф, 2004. — 101 с.
 12. Могилевская Н. С., Новиков А. М. Формализация и анализ протоколов аутентификации // *Информационное противодействие угрозам терроризма*. 2009. № 12. С. 99–102.
 13. Алферов А. П., Зубов А. Ю., Кузьмин А. С., Черемушкин А. В. Основы криптографии. — М.: Гелиос АРВ, 2002. — 480 с.
 14. Зегжда Д. П., Коваленко С. Л. Проблемы безопасности беспроводных сетей семейства IEEE 802.11a/b/g // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2006. № 2. С. 45–49.
 15. Сمارт Н. Криптография. — М.: Техносфера, 2005. С. 168–179.
 16. Романец Ю. М., Тимофеев П. А., Шаньгин В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. — М.: Радио и связь, 2001. — 376 с.
 17. Cohn-Gordon K., Cremers C., Dowling B., Garratt L., Stebila D. A Formal Security Analysis of the Signal Messaging Protocol // *2nd IEEE European Symp. on Security and Privacy (EuroS&P 2017)*. 2017. P. 451–466.
 18. Bauer R. K., Berson T. A., Feiertag R. J. A Key Distribution Protocol using Event Markers // *ACM Transactions on Computer Systems*. 1983. Vol. 1. N 3. P. 249–255.
 19. Современная криптография: теория и практика: пер. с англ. — М.: Вильямс, 2005. — С. 633–640, 656–658.
 20. Никитин В. Н., Юркин Д. В. Анализ протоколов шифрования // *Журнал радиоэлектроники*. 2009. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr09/5/text.html> (дата обращения: 14.10.2013).
 21. Никитин В. Н., Юркин Д. В. Улучшение способов аутентификации для каналов связи с ошибками // *Информационно-управляющие системы*. 2010. № 6. С. 42–46.

UDC 004.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.76

Formalized Analysis of Authentication ProtocolsYurkin D. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, dvyurkin@yandex.ruUtkina A. A.^a, Master Student, alena_utkina_95@mail.ruPervushin A. O.^b, Master Student, aeksei94@gmail.com^aThe Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 22-1, Bolshhevikov Pr., 193232, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Telecommunication system developers always try to reduce the time of authentication protocol execution using algorithmic implementation of authentication protocols. However, along with the temporal characteristics, it is always important to estimate the security, efficiency and reliability of cryptographic protocols. This can be provided by formalized analysis methods. **Purpose:** Search for typical vulnerabilities whose presence can undermine the authentication. **Methods:** On the base of predicates and postulates of formalized logic, Nikitin-Yurkin authentication protocol with keyless hash functions was analyzed. **Results:** BAN logic analysis revealed certain shortcomings in the studied protocol, which impose limitations on its application scope; namely: the lack of knowledge about how fresh a message for the authentication participants from the key distribution center is, and also the impossibility to use this protocol to uniquely identify three or more participants. The paper presents a modification of the initial authentication protocol which removed the limitations of its application. Well-founded conclusions are formulated that these studies are an effective and much-needed way of describing cryptographic protocols because they can help you determine what actions are performed by a certain protocol, and also to identify its typical shortcomings. **Practical relevance:** The results of this research allow you to improve the security of distributed radio access networks.

Keywords — Authentication, Authentication Protocol Vulnerabilities, Keyless Hash Function, BAN Logic, Authentication Logic.

Citation: Yurkin D. V., Utkina A. A., Pervushin A. O. Formalized Analysis of Authentication Protocols. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 76–83 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.76

References

1. Burrows M., Abadi M., Needham R. M. A Logic of Authentication. *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1989, vol. 426, iss. 1871, pp. 233–271. doi:10.1098/rspa.1989.0125
2. Chatzieftheriou G., Bonakdarpour B., Katsaros P., Smolka S. Abstract Model Repair. *Logical Methods in Computer Science*, 2015, vol. 11, pp. 1–43.
3. Markov A. S., Rautkin Y. V., Fadin A. A. The State and Prospects of Wi-Fi Network Security Analysis. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*, 2012, no. 1, pp. 85–90 (In Russian).
4. Hongda Yin, Guanling Chen, Jie Wang. Detecting Protected Layer-3 Rogue APs. *Broadband Communications. Networks Broadband Communications: Networks and Systems*, Raleigh, 2007, pp. 449–458.
5. Watkins L., Robinson W. H., Beyah R. A. A Passive Approach to Rogue Access Point Detection. *Global Telecommunications Conference*, Washington, 2007, pp. 355–360.
6. Chong E., Loo M., Christopher L., Marimuthu P. Intrusion Detection for Routing Attacks in Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 313–332.
7. Chung-Hsin L., Po-Cheng T., Chun-Lin L., Kuo-Hao L. The Study of the Wireless Network Dos Attack. *Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Interaction Sciences "Information Technology, Culture and Human"*, New York, 2009, pp. 418–421.
8. *Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 1. Introduction and General Model, Version 3.1.* Common Criteria Portal, 2006. Available at: <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART1V3.1R3.pdf> (accessed 20 October 2013).
9. *Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Part 2. Security Functional Requirements, Version 3.1.* Common Criteria Portal, 2006. Available at: <http://www.commoncriteriaportal.org/files/ccfiles/CCPART2V3.1R3.pdf> (accessed 20 October 2013).
10. Wagatsuma K., Harada T., Anze S., Goto Y. Formalization for Formal Analysis of Cryptographic Protocols with Reasoning Approach. *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: Future Information Technology*, Springer, 2015, pp. 25–32.
11. Kosachev A. S., Ponomarenko V. N. *Analiz podkhodov k verifikatsii funktsii bezopasnosti i mobil'nosti* [Analysis of Approaches to Verification of Safety Functions and Mobility]. Moscow, Triumph Publ., 2004. 101 p. (In Russian).
12. Mogilevskaya N. S., Novikov A. M. Formalization and Analysis of Authentication Protocols. *Informatsionnoe protivodeistvie ugrozam terrorizma*, 2009, no. 12, pp. 99–102 (In Russian).
13. Alferov A. P., Zubov A. Y., Kuzmin A. S., Cheremushkin A. V. *Osnovy kriptografii* [Fundamentals of Cryptography]. Moscow, Helios ARV Publ., 2002. 480 p. (In Russian).
14. Zegzhda D. P., Kovalenko S. L. Security Problems of Wireless Networks of the IEEE 802.11a / b / g family. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*, 2006, no. 2, pp. 45–49 (In Russian).
15. Smart N. *Kriptografiia* [Cryptography]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. Pp. 168–179 pp. (In Russian).
16. Romanets Y. M., Timofeev P. A., Shanguin V. F. *Zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh i setiakh* [Protection of Information in Computer Systems and Networks]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2001. 376 p. (In Russian).
17. Cohn-Gordon K., Cremers C., Dowling B., Garratt L., Stebila D. A Formal Security Analysis of the Signal Messaging Protocol. *IEEE European Symp. on Security and Privacy (EuroS&P)*, 2017, pp. 451–466.
18. Bauer R. K., Berson T. A., Feiertag R. J. A Key Distribution Protocol using Event Markers. *ACM Transactions on Computer Systems*, 1983, vol. 1, no. 3, pp. 249–255.
19. *Sovremennaiia kriptografiia: teoriia i praktika* [Modern Cryptography: Theory and Practice]. Moscow, Williams Publ., 2005. Pp. 633–640, 656–658 (In Russian).
20. Nikitin V. N., Yurkin D. V. Analysis of Encryption Protocols. *Zhurnal radioelektroniki*, 2009, no. 4 (In Russian). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr09/5/text.html> (accessed 14 October 2013).
21. Nikitin V. N., Yurkin D. V. Modification of Authentication Technics for Errorprone Channels. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 6, pp. 42–46 (In Russian).

УДК 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.84

СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ ПО ЗАПАХУ, ПОСТРОЕННАЯ НА ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Т. М. Татарникова^а, доктор техн. наук, профессор, tm-tatarn@yandex.ru

И. Н. Дзюбенко^а, магистрант, azruhal@gmail.com

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Постановка проблемы: при обеспечении защиты от внешних угроз террористического характера отсутствует комплексное решение, позволяющее детектировать угрозы по запаху, т. е. по нахождению определенных частиц вещества в воздухе. **Цель:** разработка концепта системы детектирования опасных веществ по запаху, построенной с применением технологии Интернета вещей. **Результаты:** создан концепт системы детектирования, позволяющей обеспечивать безопасность на территории путем обнаружения угроз по запаху. Система детектирования представляет собой разновидность беспроводной сенсорной сети с топологией типа «звезда», которая состоит из трех типов узлов: сенсорного узла, шлюза, центрального узла. Концепт доведен до макета, позволяющего обнаруживать такие угрозы, как утечка бензола, бутана, метана, пропана и возгорание на ранней стадии. Комплексность предлагаемого решения обеспечивается выбором платформы Интернета вещей. **Практическая значимость:** разработанный концепт системы детектирования на базе платформы Интернета вещей является инновационным решением, направленным на создание новой продукции, востребованной рынком систем безопасности.

Ключевые слова — безопасность человека, детектирование угроз по запаху, система детектирования, Интернет вещей, макет системы.

Цитирование: Татарникова Т. М., Дзюбенко И. Н. Система детектирования опасных веществ по запаху, построенная на технологии Интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 84–90. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.84

Citation: Tatarnikova T. M., Dzubenko I. N. IoT System for Detecting Dangerous Substances by Smell. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 84–90 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.84

Введение

Безопасность — это одна из основных проблем современности и актуальных направлений деятельности государства и общества. Безопасность и противодействие терроризму входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации [1].

Представленные на рынке технические решения обнаружения угроз человеку, обусловленных терроризмом, в основном ограничиваются незначительным выбором систем физической охраны. Однако эти системы сложно назвать идеальными, и в свете последних событий, связанных с террористическими актами, произошедшими в России и странах Европы, идеи для улучшения подобных систем и появления новых остаются актуальными [2].

Одним из признаков, указывающим на возникновение такого типа угроз, является запах. Хотя есть отдельные методы, позволяющие обнаруживать угрозы террористического характера по запаху, например с помощью детектора пороха в аэропорту, комплексных решений этой проблемы пока не существует.

В статье предлагается технология построения системы детектирования веществ по запаху, основанная на концепции Интернета вещей.

Интернет вещей (Internet of Things — IoT) — это новая инфокоммуникация, технически реализованная как вычислительная сеть, состоящая из множества физических предметов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для обмена данными между собой и внешней средой. Изначально придуманный для описания умных бытовых вещей, в настоящее время Интернет вещей стремительно развивается благодаря распространению беспроводных сетей, появлению облачных вычислений, развитию межмашинных вычислений и уменьшению стоимости производства микросхем [3].

Сегодня в среде Интернета вещей существует огромное количество разнообразных программных и аппаратных решений: «умных устройств», платформ разработки, датчиков, программного обеспечения, — что позволяет использовать технологию IoT для создания самых различных систем, в том числе и в области обеспечения безопасности [4].

Разработка системы детектирования опасных веществ по запаху включает в себя следующие этапы: создание концепта системы, выбор ее платформы реализации и аппаратных элементов, соответствующих требованиям поставленной задачи, написание программного обеспечения каждого элемента системы и их интеграция в рамках раз-

рабатываемого концепт-продукта. В работе создан упрощенный макет системы детектирования.

Обзор систем, использующих обнаружение угрозы по присутствию веществ в воздухе

Поскольку предлагаемая система детектирования задумана как некоторая комплексная реализация, то представляет интерес обзор технологических решений, использующих методы обнаружения угроз по присутствию веществ в воздухе (таблица).

Следует заметить, что из приведенных в таблице решений электронный нос мог бы претендовать на комплексность, но пока для большинства задач оно является дорогостоящим, к тому же представляет собой локальный способ детектирования [5].

Невозможно не упомянуть и о таком решении, как служебные собаки. В интересах данной работы собаки могут быть своего рода биодетекторами, способными обнаружить опасные вещества по запаху даже при очень небольшой их концентрации, и пока они обладают рядом преимуществ над датчиками запахов. Однако у них есть и множество недостатков по сравнению с технологическим решением. Служебные собаки требуют качественной многолетней дрессировки, нуждаются

в дорогостоящем содержании и сопровождении специалиста-кинолога. Кроме этого, служебных собак нельзя использовать для обнаружения химически опасных веществ. Поэтому использование служебных собак для обнаружения опасных запахов на охраняемой территории, как правило, ограничивается поиском наркотических и взрывчатых веществ в зоне входа-выхода.

Концепт системы детектирования

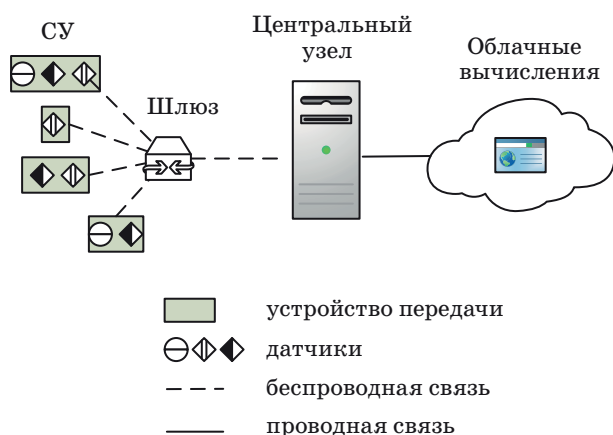
На концептуальном уровне система детектирования представляет собой разновидность беспроводной сенсорной сети с топологией типа «звезда» [6–8]. Система состоит из сенсорного узла СУ, шлюза, центрального узла (рис. 1).

Сенсорный узел представляет собой прибор передачи, к которому подключен один или набор датчиков газа, позволяющих обнаруживать различные угрозы.

Шлюз — узел агрегации данных, поступающих от множества СУ с последующей их передачей на центральный узел. Кроме агрегации шлюз обеспечивает связь между узлами системы, выполняя согласование форматов данных, скоростей и протоколов взаимодействия [9]. Взаимодействие между сенсорными узлами и шлюзом осуществляется по технологии Bluetooth, между шлюзом

- Сравнение существующих решений
- Comparison of modern solutions

| Решение | Назначение | Функциональные возможности | Область применения | Пример практического использования |
|---|---|--|---|---|
| Датчики газов | Измерение концентрации некоего газа в воздухе | Определение концентрации взрывоопасных, токсичных, горючих газов, определение опасно низкого уровня кислорода и возгорания | На объектах, где возможна утечка опасных веществ | Алкотестер Dräger Alcotest 6810 |
| Пожарные извещатели | Обнаружение возгорания | Обнаружение пожара: по повышенной температуре по присутствию дыма в воздухе по газу, выделяемому при тлении или горении материалов | На любых территориях: на предприятиях, в общественных местах, лесных массивах | Отечественный газовый пожарный извещатель ИП 435-7 производства «Юнитест», детектирующий пожар по уровню CO |
| Детекторы следовых количеств взрывчатых веществ | Охрана от террористических актов | Обнаружение остаточных следов взрывчатых веществ на одежде субъекта или в помещении | В аэропортах и метро | Детектор следов взрывчатых веществ SABRE 5000 Детектор следов BB Fido XT |
| Электронный нос | Определение запахов и вкусов | Комплексная система анализа воздуха в целях определения запаха | Контроль качества продуктов, контроль чистоты | Электронный нос Cyranose 320 |



■ *Рис. 1.* Концепт системы детектирования
 ■ *Fig. 1.* Concept of detection circuit

и центральным узлом — по Wi-Fi, соответственно, шлюз должен поддерживать обе технологии [10].

Центральный узел — сервер, обрабатывающий данные со всех узлов системы, представляет собой программное обеспечение на компьютере, обеспечивающее оператору системы детектирования доступ к веб-интерфейсу [11].

Описание реализованного макета системы детектирования

Концепт-продукт предлагаемой системы детектирования реализован в виде макета, представляющего собой цепь из сенсорного, агрегирующего и центрального устройств (рис. 2).

Макет реализован на платформе Genuino 101 по причине наличия встроенного беспроводного интерфейса и большого числа адаптированных под платформу программных и аппаратных решений. СУ представляет собой эту платформу с подключенными к ней датчиками газа, способными обнаруживать ряд угроз [12].

Набор датчиков представляет собой широко распространенные полупроводниковые датчики серии MQ производства Winsen Electronics Technology Co Ltd. Выбраны датчики MQ-3, MQ-5 и MQ-7 [13–15]. Датчик MQ-3 реагирует на пары спирта, что позволяет детектировать такие угрозы, как, например, утечка бензола на предприятии (бензол — крайне опасное летучее вещество, сильный канцероген и при больших концентрациях в воздухе взрывоопасен; широко используется в промышленности). Датчик MQ-5 реагирует на природный газ (бутан, метан, пропан). Датчик MQ-7 реагирует на монооксид углерода (угарный газ) и водород, что позволяет обнаруживать возгорания на ранней стадии. Так как эти датчики являются полупроводниковыми, присутствует



■ *Рис. 2.* Схема макета системы детектирования
 ■ *Fig. 2.* Schematic of detection system model

проблема перекрытия их показаний. В предоставленных производителем данных о датчиках указано, что датчик MQ-3 по значениям практически не пересекается с остальными (рис. 3, а), а датчик MQ-5 может также иметь реакцию на водород, пусть и в меньшем объеме, чем MQ-7 (рис. 3, б и в), что необходимо учитывать при анализе данных с датчиков.

Программное обеспечение для СУ написано средствами Arduino IDE. Данные с датчиков собираются в аналоговом виде и представлены как числа от 0 до 1024. Передача данных происходит через Bluetooth low energy (BLE) с помощью библиотеки Genuino 101 CurieBLE.

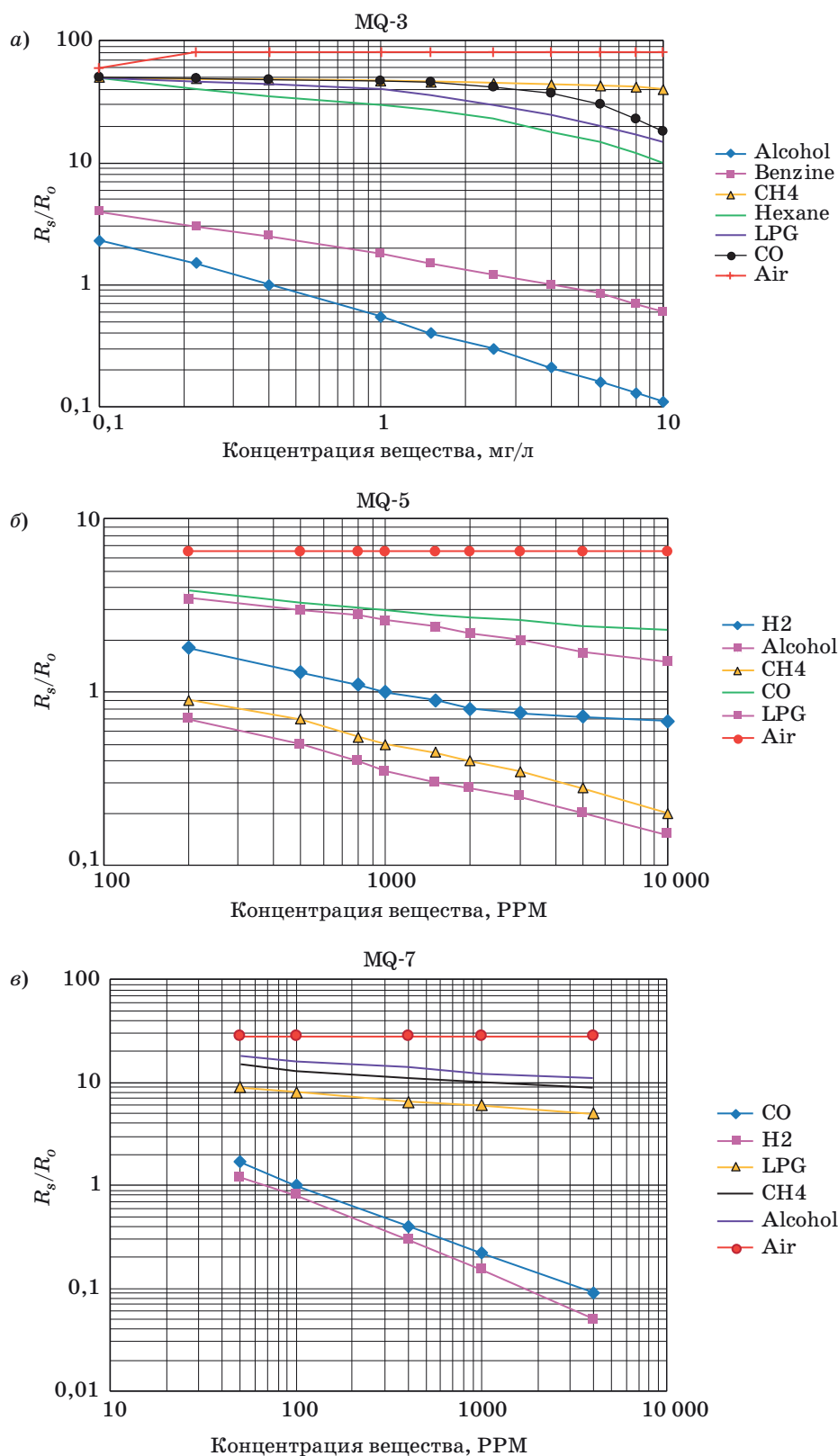
Реализованный макет СУ (рис. 4, а и б) способен обнаруживать такие угрозы, как утечка бензола, природного газа и возгорания на ранней стадии, и имеет возможность передавать данные об этих событиях по технологии BLE.

Для обеспечения задач шлюза выбрана платформа Intel Edison, поддерживающая технологии BLE и Wi-Fi. Intel Edison — это полноценный компьютер на плате (computer on board) с двухъядерным процессором Atom, 1 ГБ оперативной памяти, 4 ГБ eMMC флеш-памяти, модулями Wi-Fi, Bluetooth 4 и контроллером USB. Для обеспечения питания платформа Intel Edison подключена через коннектор Hirose 70-pin DF40 Series к Arduino-совместимой плате расширения (рис. 5).

Программное обеспечение для шлюза написано средствами программной платформы Node.js, представляющей собой транслятор языка JavaScript в машинный код, что позволяет использовать JavaScript как язык общего назначения.

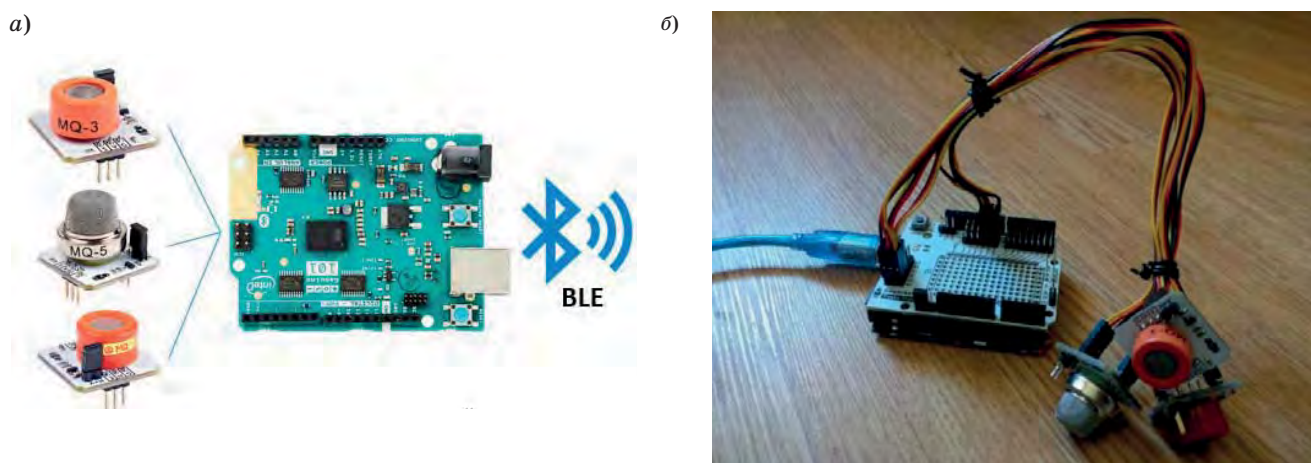
Центральное устройство реализовано как локальный сервер на компьютере средствами программной платформы Node.js. Кроме обработки поступающих данных сервер обеспечивает работу простого веб-приложения для оператора системы детектирования. Веб-приложение использует фреймворк node express [16].

Обработка получаемых сервером данных происходит следующим образом: для каждого датчика запоминаются 10 последних значений; если новое значение m_i датчика больше суммы усредненного по десяти значениям показаний и порога Δ (для MQ-5 и MQ-7 $\Delta = 20$, для MQ-3 $\Delta = 50$), то счи-

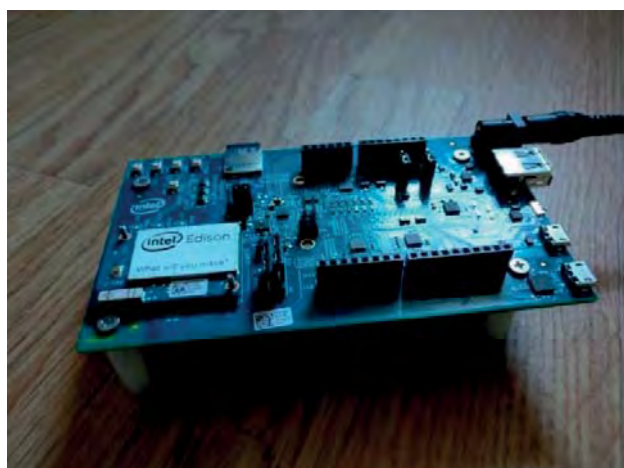


■ **Рис. 3.** Отношение концентрации веществ к показаниям R_s/R_0 датчика MQ-3 (а), MQ-5 (б) и MQ-7 (в) (R_s — сопротивление датчика при определении им концентрации газа в окружающей среде, R_0 — сопротивление датчика, измеренное при определенной концентрации детектируемого газа)

■ **Fig. 3.** The ratio of the concentration of substances to the readings of the R_s/R_0 of the MQ-3 (a), MQ-5 (б) and MQ-7 (в) sensor (R_s is the resistance of the sensor when determining the gas concentration in the environment, R_0 is the resistance of the sensor measured at a certain concentration of the detected gas)



■ *Рис. 4.* Общая схема (а) и вид (б) реализованного сенсорного устройства
 ■ *Fig. 4.* General scheme (a) and form (b) of the realized sensor device



■ *Рис. 5.* Реализованное агрегирующее устройство
 ■ *Fig. 5.* The realized aggregating device

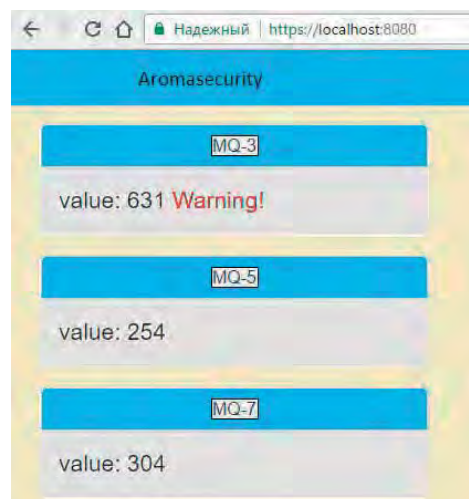
тается, что датчик сработал на резкое повышение концентрации вещества:

$$m_i > \frac{\sum_{k=1}^{10} m_k}{10} + \Delta.$$

На странице веб-приложения выводятся данные с датчиков, и если значение концентрации вещества превышает допустимое, то напротив значения датчика появится соответствующее сообщение (рис. 6).

Заключение

Предложенный в работе концепт системы детектирования на базе платформы Интернета ве-



■ *Рис. 6.* Страница веб-приложения центрального устройства
 ■ *Fig. 6.* The central device web application page

щей по сути варианта исполнения является инновационным решением, поскольку оно направлено на создание, главным образом, новой продукции, востребованной рынком систем безопасности.

Имея широкий спектр применения, система детектирования, позволяющая обеспечивать безопасность на территории путем обнаружения угроз по запаху, в ближайшее время может стать ключевым направлением развития индустрии безопасности, открывающим новые возможности для повышения качества подобных систем.

Разработанный концепт-продукт системы детектирования в виде макета демонстрирует возможности по обнаружению таких угроз, как утечка бензола, бутана, метана, пропана и возгорания на ранней стадии.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 25.03.2015 № 272 «Об утверждении требований к антитеррористической защищенности мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране полицией, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий)». <http://pravo.gov.ru/proxy/ips> (дата обращения: 19.08.2017).
2. Р 78.36.026-2012 Рекомендации по использованию технических средств обнаружения, основанных на различных физических принципах, для охраны огражденных территорий и открытых площадей. — М.: НИЦ «Охрана», 2012. — 182 с.
3. Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. The Internet of Things: Key Applications and Protocols. — Willey, 2012. — 370 p.
4. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 160 с.
5. Долгополов Н. В., Яблоков М. Ю. «Электронный нос» — новое направление индустрии безопасности // Мир и безопасность. 2007. № 3. С. 54–59.
6. Recommendation Y.2060: Overview of Internet of Things. — Geneva: ITU-T, February 2012. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I> (дата обращения: 26.01.2017).
7. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет вещей. — Самара: ПГУТИ, 2014. — 200 с.
8. Татарникова Т. М., Елизаров М. А. Модель оценки временных характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 44–50. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.44
9. Kellmerit D. The Silent Intelligence: The Internet of Things. — DND Ventures LLC, 2013. — 454 p.
10. Татарникова Т. М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 92–98. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
11. Bonomi F. Fog Computing and its Role in the Internet of Things // Proc. of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. 2012. P. 13–16.
12. IEEE Std 802.11-2007 IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. — IEEE Computer Society, June 2007. <https://www.twirpx.com/file/1167805/> (дата обращения: 01.02.2018).
13. Technical Data MQ-3 Gas Sensor. <https://arduino-market.ru/sensory-:datchiki/modul-mq-3> (дата обращения: 01.02.2018).
14. Technical Data MQ-5 Gas Sensor. https://arduino-market.ru/uploads/DatasheetMQ_5.pdf (дата обращения: 01.02.2018).
15. Сайт gas-sensor.ru (дата обращения: 01.02.2018).
16. Recommendation Y.2069: Framework of the WEB of Things. — Geneva: ITU-T, July 2012. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2069-201207-I> (дата обращения: 01.02.2018).

UDC 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.84

IoT System for Detecting Dangerous Substances by Smell

Tatarnikova T. M.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, tm-tatarn@yandex.ruDzubenko I. N.^a, Graduate Student, azruhal@gmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When providing protection against external terrorist threats, there is no comprehensive solution which would allow you to detect threats by smell, i.e. by finding certain matter particles in the air. **Purpose:** Concept of dangerous substance smell detection system built with the use of Internet of Things (IoT) technology. **Results:** We have created a concept of a detection system which would provide security within a certain area by detecting smell threats. The detection system is a variation of wireless sensor network with a “star” topology, consisting of three types of nodes: a sensor node, a gateway, and a center node. The concept has reached a prototype which detects such threats as leaks of benzene, butane, methane or propane and early-stage conflagration. The comprehensiveness of the proposed solution is provided by choosing IoT as a platform. **Practical relevance:** The developed concept is an innovative solution which can be used to create new products demanded at the market of security systems.

Keywords — Human Security, Detection of Threats by Smell, Detection System, Internet of Things, System Prototype.

Citation: Tatarnikova T. M., Dzubenko I. N. IoT System for Detecting Dangerous Substances by Smell. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 84–90 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.84

References

1. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 25.03.2015 N 272 "Ob utverzhdenii trebovaniy k antiterroristicheskoi zashchishchennosti mest massovogo prebyvaniia liudei i ob"ektov (territorii), podlezhashchikh obiazatel'noi okhrane politsiei, i form pasportov bezopasnosti takikh mest i ob"ektov (territorii)"* Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips> (accessed 19 August 2017).
2. *R 78.36.026-2012 Rekomendatsii po ispol'zovaniiu tekhnicheskikh sredstv obnaruzheniia, osnovannykh na razlichnykh fizicheskikh printsipakh, dlia okhrany ograzhdennykh territorii i otkrytykh ploshchadok* [R 78.36.026-2012 Recommendations on the Use of Detection Technology based on Various Physical Principles for the Protection of Fenced Areas and Open Areas]. Moscow, Nauchno-issledovatel'skiy tsentr "Okhrana" Publ., 2012. 182 p. (In Russian).
3. Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. Wiley, 2012. 370 p.
4. Gol'dshtejn B. S., Kucherjavij A. E. *Seti svjazi post-NGN* [Post-NGN Communication Networks]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2014. 160 p. (In Russian).
5. Dolgopolov N. V., Yablokov M. Yu. Electronic Nose — a New Direction of the Security Industry. *Mir i bezopasnost'* [Peace and Security], 2007, no. 3, pp. 54–59 (In Russian).
6. *Recommendation Y.2060: Overview of Internet of Things*. Geneva, ITU-T, February 2012. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I> (accessed 26 January 2017).
7. Roslyakov F. V., Vanyashin S. V., Grebeshkov A. Y., Samsonov M. Y. *Internet veshchei* [Internet of Things]. Samara, PGUTI Publ., 2014. 200 p. (In Russian).
8. Tatarnikova T. M., Elizarov M. A. Model of Estimating Temporal Characteristics of IoT Network Interaction. *Informatsionno-upravlyayushhie systemy* [Information and Control System], 2017, no. 2, pp. 44–50 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.44
9. Kellmerit Daniel. *The Silent Intelligence: The Internet of Things*. DND Ventures LLC, 2013. 454 p.
10. Tatarnikova T. M. Structural Synthesis of an Interface Center for Corporate Networks. *Informatsionno-upravlyayushhie systemy* [Information and Control System], 2015, no. 3, pp. 92–98 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
11. Bonomi F. Fog Computing and its Role in the Internet of Things. *Proc. of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, 2012, pp. 13–16.
12. *IEEE Std 802.11-2007 IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Network — Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Computer Society, June 2007. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1167805/> (accessed 01 February 2018).
13. *Technical Data MQ-3 Gas Sensor*. Available at: <https://arduino-market.ru/sensory-:datchiki/modul-mq-3> (accessed 01 February 2018).
14. *Technical Data MQ-5 Gas Sensor*. Available at: https://arduino-market.ru/uploads/DatasheetMQ_5.pdf (accessed 01 February 2018).
15. Available at: gas-sensor.ru (accessed 01 February 2018).
16. *Recommendation Y.2069: Framework of the WEB of Things*. Geneva, ITU-T, July 2012. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2069-201207-I> (accessed 01 February 2018).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

УДК 629.7.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.91

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ НА НИЗКОЛЕТЯЩЕМ АППАРАТЕ

А. Ю. Княжский^{а, 1}, ассистент, knjagskij@mail.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Постановка проблемы: во время низковысотного полета над взволнованной морской поверхностью профили волн имеют переменные возвышения, уклоны и орбитальные скорости, в результате чего возникают специфические условия работы измерительной аппаратуры. Это создает существенную помеху при измерении высоты. Для управления низколетящим аппаратом необходимо оценивать также интенсивность и направление движения морских волн. **Цель:** структурно-параметрический синтез системы измерения высоты низколетящего аппарата над морской поверхностью и анализ ее точности с учетом особенностей морского волнения. **Методы:** комплексирование разнотипных датчиков с различными спектральными характеристиками; робастный метод, принимающий заглубленные, но достоверные спектрально-корреляционные характеристики сигналов локационного высотомера и вертикального акселерометра. **Результаты:** проведен структурно-параметрический синтез системы измерения истинной и абсолютной высот, интенсивности и направления распространения волн. В отличие от использовавшейся ранее, предлагаемая система оценивает интенсивность и направление распространения волн и меньше подвержена помехам, вызываемым морским волнением. Точность работы разработанной системы сравнивается с точностью времяпролетной камеры. **Практическая значимость:** применение разработанной измерительной системы позволяет оценивать истинную и абсолютную высоты низколетящего морского аппарата, интенсивность и направления распространения морских волн. В результате параметрической оптимизации коэффициентов передаточных функций точность оценки возрастает в три раза.

Ключевые слова — оптимизация, морское волнение, измерение высоты, комплексирование, низковысотный полет.

Цитирование: Княжский А. Ю. Синтез и анализ точности системы измерения параметров морского волнения, используемой на низколетящем аппарате // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 91–95. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.91

Citation: Knyazhsky A. Yu. Synthesis and Accuracy Analysis of Altitude-Above-Sea-Surface Measuring System used on Low-Flying Vehicle. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 91–95 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.91

Введение

При низковысотном полете над взволнованным морем измерение параметров движения осложняется необходимостью получать оценку параметров, требуемых для управления полетом, в реальном масштабе времени. Одним из подходов к решению этой задачи является комплексирование информации от разнотипных датчиков с отличающимися спектрами погрешностей. В работах [1, 2] рассмотрены измерители высот, применяемые на низколетящих аппаратах. В настоящей статье проводится параметрическая оптимизация измерительной системы (ИС), обеспечивающей необходимую для низковысотного полета точность определения истинной и абсолютной высот.

Исследуемый в работе [3] метод позволяет при небольшом (порядка 20°) различии между перпендикуляром к направлению распространения мор-

ского волнения и направлением на конечную точку маршрута прокладывать траекторию летательного аппарата преимущественно над ложбинами волн. Такой способ движения увеличивает аэродинамическое качество экраноплана и безопасность движения низколетящих аппаратов [4]. Как при реализации управления на основе данного алгоритма, так и при прямолинейном полете низколетящего аппарата необходимо знать абсолютную высоту полета экраноплана относительно среднего уровня взволнованной морской поверхности. Зависимости эффективности минимизации высоты от характеристик морского волнения приведены в работе [5]. Проблемы управления движением морских низколетящих аппаратов и измерения параметров их движения изложены в работах [6–12].

Истинная высота полета определяется по показаниям локационного высотомера. Абсолютную высоту можно определить, пропуская показания локационного высотомера через фильтр нижних частот, однако при этом возникнет нежелательное запаздывание в измерениях. Избежать запаздывания можно не только в интегрированной системе с двумя разнотипными датчиками — позиционным и инерциальным.

¹ Научный руководитель — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. В. Небылов.

Предлагается ИС для измерения вектора, элементами которого являются абсолютная высота, истинная высота, интенсивность морского волнения и направление распространения морских волн. Типичная ИС параметров движения низколетающего аппарата не включает оценку интенсивности морского волнения и направления распространения волн. Добавление этих двух величин в выходной вектор оценок параметров полета позволяет адаптировать алгоритм прокладки траектории по ложбинам волн к текущим условиям морского волнения, оценить безопасность полета по ее зависимости от характеристик морского волнения и оценить целесообразность прокладки пути по ложбинам волн с учетом различия между требуемым курсом и направлением распространения волн.

В работе измеритель на базе локационных высотомеров и акселерометров сравнивается с измерителем на базе времяпролетной камеры. Предлагается алгоритм, который по матрице высот позволяет оценивать истинную и абсолютную высоты, интенсивность морского волнения и направление распространения морских волн.

Синтезируем измерительную систему, вырабатывающую описанный выше вектор \hat{Y} :

$$\hat{Y} = [h_{абс} \ h_{ист} \ \hat{\xi} \ \alpha]^T,$$

где $h_{абс}$ — абсолютная высота полета; $h_{ист}$ — истинная геометрическая высота полета; $\hat{\xi}$ — средняя высота волн; α — направление распространения морских волн. Под синтезом ИС понимается параметрическая оптимизация коэффициентов ее передаточной функции.

Измерение высоты локационными высотомерами и акселерометрами

Локационные высотомеры имеют широкую диаграмму направленности и определяют высоту по первому моменту времени прихода сигнала. Поскольку низколетающий аппарат движется с малыми углами наклона (в пределах единиц градусов), высота определяется практически без погрешностей, вносимых креном и тангажом.

Классическая ИС параметров движения низколетающего аппарата включает три локационных высотомера и три акселерометра с вертикальными осями чувствительности. Это оборудование и определяет вектор входных параметров оптимизируемой ИС

$$X = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ a_1 \ a_2 \ a_3]^T,$$

где h_i — истинная высота с i -го высотомера; a_i — вертикальное ускорение с i -го акселерометра.

Помимо элементов вектора X определяются скорость v и курс γ . Обработка этих параметров движения и параметра α в Y может проводиться в отдельном канале системы управления вследствие их слабой связи с высотой полета и ее производными. Это позволяет сократить размерность $\hat{Y} = [h_{абс} \ h_{ист} \ \hat{\xi}]^T$.

Зависимость выходного вектора \hat{Y} от входного вектора X определяется уравнением

$$\hat{Y} = GX,$$

где G — матрица операторов свертки.

Элементы g_{ij} матрицы G определяются выражением

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} & g_{15} & g_{16} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & 0 & 0 & 0 \\ n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 \end{bmatrix};$$

$$g_{ij}(x_i(t)) = \begin{cases} \frac{1}{3} \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(\tau) x_i(t-\tau) d\tau & \text{для } i \leq 3 \text{ и } j = 1, 2 \\ \frac{1}{3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(\tau) x_i(t-\tau) d\tau dt dt & \text{для } i > 3 \text{ и } j = 1 \end{cases}, \quad (*)$$

$$\text{где } n_1 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{11} - p_{21}) dt; \quad n_2 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{12} - p_{22}) dt;$$

$$n_3 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{13} - p_{23}) dt; \quad n_4 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{14} - p_{21}) dt;$$

$$n_5 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{15} - p_{22}) dt; \quad n_6 = \frac{1}{3} \int_0^T (p_{16} - p_{23}) dt;$$

h_{ij} — импульсная характеристика; t — момент времени измерения; τ — время, отсчитываемое в обратном направлении (задержка); i — индекс измерительного прибора; j — индекс выходного параметра.

Поскольку g_{ij} — оператор, то $g_{ij}x_j$ означает не произведение, а действие оператора g_{ij} на x_j , действие оператора определено выражением (*).

Погрешность локационного высотомера распределена по нормальному закону [1]. Погрешность акселерометра ограничена максимальными значениями величины и скорости ухода [2].

Запишем подлежащие параметрической оптимизации передаточные функции локационного $H_1(s)$ и инерциального $H_2(s)$ датчиков с учетом условия $\lim_{s \rightarrow \infty} H_1(s) = 0$:

$$H_1(s) = (b_{10} + b_{11}s + b_{12}s^2) / A(s);$$

$$H_2(s) = (b_{22}s^2 + a_3s^2) / A(s),$$

где $A(s) = 1 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3$.

Оптимизируем семь неизвестных параметров передаточной функции $\{a_1, a_2, a_3, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}\}$. Коэффициенты оптимизировались по критерию минимума максимальной ошибки системы. Максимальная ошибка ИС e_{\max} принята как пятикратная среднеквадратическая и является суммой максимальных ошибок высотомера $e_{\max1}$ и акселерометра $e_{\max2}$:

$$e_{\max1} = 5 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(s)|^2 S_{\text{вх}}(\omega) d\omega}.$$

Здесь $S_{\text{вх}}(\omega)$ — спектральная плотность входного сигнала:

$$S_{\text{вх}}(\omega) = \frac{\alpha}{2\omega^3} \exp\left[-\frac{\beta g^2}{U^4 \omega^2}\right],$$

где $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$; $\beta = 0,74$; g — ускорение свободного падения; U — скорость ветра. Максимальная ошибка акселерометра $e_{\max2} = 10^{-3}$ м [2].

Численная оптимизация передаточных функций при условии инвариантности $H_1(s) + H_2(s) = 1$ и ограничении максимальных вертикальной скорости $h^{(1)} = 2$ м/с и ускорения $h^{(2)} = 4$ м/с² дала следующие результаты: $a_1 = 11,9$, $a_2 = 76,9$, $a_3 = 92,7$, $b_{10} = 0,991$, $b_{11} = 11,8$, $b_{12} = 75,7$, $b_{22} = 0,230$.

При небольших (до 10°) углах визирования локационным высотомером и небольших уклонах морской волны диаграмму обратного рассеяния можно считать равномерной и стационарной, а демодуляция возвратившегося в антенну сигнала происходит так, что измеренное значение высоты равно высоте аппарата относительно уровня, соответствующего средней ординате облучаемого участка морской поверхности [2].

Измерение высоты времяпролетной камерой

Суть времяпролетного метода измерения высоты заключается в измерении времени, которое требуется световому сигналу для прохождения расстояния между камерой и подстилающей поверхностью. Для этого камера излучает модулированное излучение инфракрасного диапазона с некоторой частотой модуляции f_{mod} . После чего специальная схема вычисляет фазовый сдвиг φ между принятым и излученным сигналом, который пропорционален высоте полета $h_{\text{ист}}$ [1]:

$$h_{\text{ист}} = \frac{c\varphi}{4\pi f_{\text{mod}}},$$

где c — скорость света.

Результатом измерения расстояний до подстилающей поверхности времяпролетной камерой является матрица высот, соответствующих точкам поверхности, попадающих в поле зрения камеры. Размер матрицы соответствует количеству чувствительных элементов датчика. Дальность до подстилающей поверхности измеряется в радиальной системе координат, после чего данные пересчитываются в декартову систему. Максимальная высота, корректно измеряемая камерой, равняется отношению скорости света к удвоенной частоте модуляции.

Например, камера O3D201, имеющая тип датчика PMD 3D chip, с частотой 20 Гц выдает матрицу размером 50 × 64 пикселей для изображения, полученного при диаграмме направленности 30 × 40 град.

За счет сокращения размеров матрицы проживанием снизится количество необходимых вычислительных операций для ее обработки и, соответственно, увеличится скорость определения высоты. Поскольку измерения проводятся на малой высоте с достаточно узким углом обзора, изображение облученного участка поверхности имеет несложную геометрическую форму, которую можно аппроксимировать плоскостью. Поэтому искать наименьшее значение матрицы можно даже по четырем крайним элементам.

Так же как и с использованием точечного локационного высотомера, высота морской волны в этом случае определяется вычитанием из абсолютной высоты аппарата его истинной геометрической высоты.

Моделирование

Моделировалось равномерное прямолинейное движение аппарата на высотах 3, 4 и 5 м со скоростями 50–180 км/ч под углами относительно направления распространения морского волнения 0–90°. Интенсивность морского волнения составляла 3–6 баллов. Высота волн определялась по формуле [6]

$$\xi(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} \cos(k_i x \cos(\alpha_j) + k_i y \sin(\alpha_j) + \varepsilon_{ij}),$$

где n — число гармоник с разными частотами; m — число гармонических волн с разными направлениями распространения, $n = m = 7$; k_i — пространственная частота волны; α_j — угол, характеризующий направление распространения

гармонической волны; r_{ij} — амплитуда волны с i -й частотой и j -м направлением распространения; ε_{ij} — фаза, представляемая случайным числом с равномерным распределением.

Пространственные частоты определяются по формуле [3] $k_i = \Omega_i^2/g$, где Ω — среднеквадратическая частота спектра: $\Omega = 0,77 \times \left(\frac{g}{h_{3\%}} \right)^{\frac{1}{2}}$, где

$h_{3\%}$ — высота морских волн с обеспеченностью 3 %.

При моделировании среднеквадратическое отклонение погрешности высотомера составляло 0,3 м, постоянная времени бралась 0,1 с. Уход нуля шкалы акселерометра составлял 10^{-4} м/с², скорость ухода 10^{-6} м/с². Для времяпролетной камеры брались характеристики камеры 03D201. Всего было проведено 70 экспериментов. Наибольшая составляющая погрешности моделирования возникает из-за неточности передачи геометрических характеристик морских волн и не превышает 5 %.

Моделирование показало, что погрешность оценки истинной высоты после оптимизации передаточной функции ИС составила 0,1 м. Погрешность времяпролетной камеры меньше на сотые доли метра, поэтому точность обоих средств измерения можно считать одинаковой. Погрешность оценки интенсивности морского волнения ИС на основе высотомеров и акселерометров и времяпролетной камеры составила 0,1 м.

Заключение

В работе проведен синтез и параметрическая оптимизация ИС высоты движения и интенсивности морского волнения. Основное преимущество ИС на базе высотомеров перед времяпролетной камерой — в большей скорости обработки измерений. У времяпролетной камеры — в возможности получения более полной информации о параметрах морского волнения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 16-19-10381.

Литература

1. Aerospace Navigation Systems/ A. Nebylov, J. Watson (Ed). — J. Wiley & Sons, UK, 2016. — 372 p.
2. Nebylov A. V., Wilson P. Ekranoplanes: Controlled Flight Close to the Sea. — Southampton: WIT Press, 2002. — 312 p.
3. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Способ управления продольным и боковым движением экраноплана // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 4. С. 18–24.
4. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Увеличение аэродинамического качества экраноплана за счет огибания волн // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6. С. 24–28. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.24
5. Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А. Влияние характеристик морского волнения на качество управления полетом экраноплана в режиме огибания волн // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 7. С. 3–8.
6. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 489308. 7 p. doi:10.1155/2014/489308
7. Liang Yun, Alan Bliault, Johnny Doo. WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology. — Springer, 2010. — 443 p.
8. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground Effect” Inter-Modal Fast Sea Transport. TransNav // The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 317–320.
9. Pagowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground Effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping // The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2014. Vol. 8. N 2. P. 221–234.
10. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft // 7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science. 2013. P. 15–24.
11. Rozhdestvensky K. V. Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect. — Springer Science & Business Media, 2000. — 352 p.
12. Трубкин И. П. Ветровое волнение (взаимосвязи и расчет вероятностных характеристик). — М.: Научный мир, 2007. — 264 с.

UDC 629.7.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.91

Synthesis and Accuracy Analysis of Altitude-Above-Sea-Surface Measuring System used on Low-Flying VehicleKnyazhsky A. Yu. ^a, Assistant Professor, knjagskij@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: During a low-altitude flight over a disturbed sea surface, the wave profiles have variable elevations, gradients and orbital velocities, resulting in specific conditions for the operation of the measuring devices. This creates a significant obstacle in measuring the altitude. Also, to control a low-flying apparatus, it is necessary to estimate the intensity and direction of motion of the sea waves. **Purpose:** Structural-parametric synthesis of a system for measuring the altitude of a low-altitude vehicle over the sea surface and analyzing its accuracy, taking into account the peculiarities of the sea waves. **Method:** Complexation of different types of sensors with different spectral characteristics. A robust method which takes on corrupted but reliable spectral-correlation characteristics of the signals from a local altimeter and a vertical accelerometer. **Results:** Structural-parametric synthesis has been performed for a system of measuring the true and absolute heights, the intensity and direction of the wave propagation. Unlike the one used earlier, the proposed system evaluates the intensity and direction of the wave propagation, and is less susceptible to interference caused by the waves. The accuracy of the developed system is compared with the accuracy of a time-of-flight camera. **Practical relevance:** The application of the developed measuring system makes it possible to evaluate the true and absolute altitudes of a low-flying vehicle, the intensity and direction of the propagation of sea waves. As a result of parametric optimization of the coefficients of the transfer functions, the estimation accuracy increases three-fold.

Keywords — Optimization, Sea Waves, Altitude Measurement, Complexation, Low-Altitude Flight.

Citation: Knyazhsky A. Yu. Synthesis and Accuracy Analysis of Altitude-Above-Sea-Surface Measuring System used on Low-Flying Vehicle. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 91–95 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.91

References

1. *Aerospace Navigation Systems*. A. Nebylov, J. Watson (Ed). J. Wiley & Sons, UK, 2016, 372 p.
2. Nebylov A. V., Wilson P. *Ekranoplanes: Controlled Flight Close to the Sea*. Southampton, UK, WIT Press, 2002. 312 p.
3. Knyazhsky A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Ground Effect Vehicle Longitudinal and Lateral Motion Control Method. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2017, no. 4, pp. 18–24 (In Russian).
4. Knyazhsky A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Improving GEV Aerodynamic Quality by Enveloping Sea Waves. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 24–28 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.24
5. Knyazhsky A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Influence of the Characteristics of Sea Waves on the Quality of Ekranoplane Flight Control in the Mode of Bending Around Big Waves. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2017, no. 7, pp. 3–8 (In Russian).
6. Tofa M. M., Maimun A., Ahmed Y. M., Jamei S., Priyanto A., Rahimuddin. Experimental Investigation of a Wing-in-Ground Effect Craft. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, Article ID 489308, 7 p. doi:10.1155/2014/489308
7. Liang Yun, Alan Bliault, Johnny Doo. *WIG Craft and Ekranoplan: Ground Effect Craft Technology*. Springer, 2010. 443 p.
8. Pagowski Z. T., Szafran K. “Ground Effect” Inter-Modal Fast Sea Transport. *TransNav. The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 317–320.
9. Pagowski Z. T., Szafran K., Kończak J. “Ground Effect” Transport on the Baltic Sea, Maritime Transport & Shipping. *The Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 221–234.
10. Wang H., Teo C. J., Khoo B. C., Goh C. J. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-InGround (WIG) Craft. *7th Asian-Pacific Conf. on Aerospace Technology and Science*, 2013, pp. 15–24.
11. Rozhdstvensky K. V. *Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect*. Springer Science & Business Media, 2000. 352 p.
12. Trubkin I. P. *Vetrovoe volnenie (vzaimosvazi i raschet veroiatnostnykh kharakteristik)* [Wind Turbulence (Interrelations and Calculation of Probabilistic Characteristics)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007. 264 p.

ДИАГНОСТИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА-НАВИГАТОРА НА ОСНОВЕ ЗАДАЧНОГО ПОДХОДА

А. П. Григорьев^{а, б}, ассистент, начальник проектно-конструкторского сектора, alexgrid-1986@mail.ru

С. Г. Бурлуцкий^а, канд. техн. наук, доцент, sergey_burluckiy@mail.ru

А. О. Чернелевский^{а, в}, магистр, инженер 2-й категории, anatoliy.chernelevskiy@mail.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

^бАО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», Комсомола ул., 1–3, Санкт-Петербург,
195009, РФ

^вПАО «Техприбор», Варшавская ул., 5а, Санкт-Петербург, 196084, РФ

Постановка проблемы: благодаря компьютеризации образовательного процесса и использования дистанционных адаптивных обучающих систем можно реализовать сквозную непрерывную подготовку высококвалифицированных кадров, способных решать широкий спектр прикладных инженерных задач. При этом в обязательном порядке для мониторинга знаний и умений требуется проводить непрерывную диагностику обучаемого. **Цель:** разработка системы диагностики навигационных умений на базе задачного подхода с использованием вывода на аппарате бинарных деревьев посредством графосемантического ранжирования сложности отдельных действий при решении обучаемым типовой практической задачи. **Результаты:** сформулирована основная задача, решаемая экспертной диагностирующей системой при обучении авиационных специалистов, — диагностика знаний и практических умений. За счет графосемантического подхода осуществлено объективное ранжирование отдельных действий оператора при построении частного семантического графа на основании задачи, решаемой обучаемым. При создании и последующем функционировании разработанной дистанционной адаптивной системы обучения применение аппарата бинарных деревьев позволило проанализировать все возможные варианты решения задачи и на базе простых математических действий запрограммировать решение. Применив указанные выше подходы с использованием аппарата нечеткой логики, авторы выдвинули гипотезу о возможности рассчитать степень приближения ответа обучаемого к эталону (правильному ответу), тем самым эффективно диагностируя его знания и умения на всех этапах решения задачи. **Практическая значимость:** разработанная система позволяет сократить время обучения, интенсифицировать обучающий процесс и повысить степень усвоения знаний и умений. Осуществляется разгрузка инструктора (преподавателя) за счет его освобождения от выполнения ряда технологических операций, связанных с обработкой и проверкой результатов решения обучаемыми практических заданий.

Ключевые слова — подготовка авиационных специалистов, контроль знаний, диагностика умений, адаптивные обучающие системы, задачный подход, семантические графы, бинарные деревья, адаптивность.

Цитирование: Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Чернелевский А. О. Диагностирующая система деятельности оператора-навигатора на основе задачного подхода // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 96–103. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.96

Citation: Grigoryev A. P., Burlutsky S. G., Chernelevisky A. O. Operator-Navigator Activity Diagnostics System based on Task Approach. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 96–103 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.96

Введение

В широком смысле диагностикой называют процесс поиска неисправности в системе, основанный на интерпретации данных. Применительно к процессу обучения диагностика означает выявление тех знаний/умений, которыми обучаемый не овладел.

Цели диагностики неразрывно связаны с целями обучения. Критериями эффективности используемой модели информационной технологии педагогической диагностики являются [1]:

— соответствие в выявлении ошибок с помощью корректировки модели информационной технологии педагогической диагностики результатам, полученным традиционным способом;

— соответствие диагностического суждения, полученного с помощью корректировочной модели информационной технологии педагогической диагностики, результатам обучения учащегося;

— уменьшение затрат труда преподавателя-эксперта при улучшении (или неизменности) результатов обучения.

К дидактическим ограничениям относится тот факт, что диагностика в электронном учебнике способна выявлять недостатки в усвоении именно содержания электронного учебника.

При построении экспертной системы [2], предназначенной для диагностики текущего состояния знаний/умений обучаемого, возможны два подхода.

1. Подход, подчиненный логике раскрытия темы или раздела. При этом подбираются задачи (вопросы), суммарный спектр которых, т. е. совокупность всех знаний/умений, необходимых для решения исходной задачи, покрывает соответствующую часть предметной модели обучаемого по диагностируемой теме.

2. Подход, заключающийся в том, что предметная модель обучаемого ограничивается спектром какой-либо задачи или набора задач, т. е. второй подход подчинен логике решения определенной задачи. Этот так называемый задачный подход вытекает из деятельностной природы обучения. Как известно, механизмом осуществления деятельности является решение задач. Если обучаемый правильно решает задачу, то текущая модель обучаемого совпадает с локальной предметной моделью, и не требуется никаких корректировок учебного процесса. Если допущена ошибка, то задача диагностирующей системы заключается в определении тех необходимых для решения знаний/умений, которыми обучаемый не владеет (процесс восстановления знаний).

Алгоритм символьных преобразований математических выражений

При контроле решения обучаемым навигационных задач одну из ключевых ролей играют символьные преобразования математических выражений, которые необходимы при сравнении ответа обучаемого и ответа, полученного системой. Одно и то же математическое выражение может быть представлено различными семантически эквивалентными формулами. Поэтому, прежде чем сравнивать свой ответ и ответ обучаемого, система осуществляет приведение обоих ответов к некоторой стандартной форме. Что понимать под стандартной формой, определяет разработчик обучающего курса, который задает формулы преобразования в модуле символьных преобразований.

В процессе проектирования модуля символьных преобразований возникла необходимость решения следующих задач: выбора способа представления математических формул в памяти компьютера; разработки алгоритма преобразования формул к выбранному представлению; разработки стандартного вида формул; разработки алгоритма приведения формул к стандартному виду; разработки метода символьных преобразований.

Одним из первых возникших при реализации символьных преобразований был вопрос представления математических формул в памяти компьютера. Очевидно, что от пользователя формулы могут поступать в систему только в виде строк символов. Однако преобразование формул,

представленных строками, сложно и неэффективно. Поэтому было использовано представление формул в виде бинарных деревьев [3], которое было адаптировано для объектно-ориентированной парадигмы программирования. Для преобразования формул из строкового представления в бинарное дерево были использованы методы теории трансляции [4]. В модуле, выполняющем эти преобразования, можно выделить два основных компонента: лексический и синтаксический анализаторы. Лексический анализатор выделяет из входной строки отдельные лексемы. К лексемам относятся: числа — последовательности цифр, содержащие или не содержащие десятичную точку; переменные, представленные последовательностями букв и цифр, начинающимися с буквы (идентификаторами); знаки арифметических операций «+», «-», «*», «/», «^»; имена функций — идентификаторы, за которыми непосредственно следует левая круглая скобка, левая и правая круглые скобки, запятая.

Диагностирующая система деятельности оператора-навигатора на основе задачного метода

Как уже было сказано, одним из важнейших дидактических средств подготовки оператора-навигатора является система задач, при решении которых он не только закрепляет полученные теоретические знания, но и приобретает умения и навыки, необходимые в его профессиональной деятельности. Рассмотрим пример, когда по запросу оператора осуществляется оценка его решения, диагностирование возможных ошибок и предъявление на экране результатов расчетов эталонных (выполненных персональным компьютером) и фактических (выполненных обучаемым с помощью реальных приборов). Рассмотрим в качестве сценария обучения задачный подход на примере темы «Расчет условного курса на следующий этап полета».

Исходными данными задачи являются: ЗУПУ — заданный условный путевой угол, град; σ — направление ветра, град; V — истинная воздушная скорость, км/ч; U — скорость ветра, км/ч. В результате решения задачи рассчитываются: УВ — угол ветра, град; УС — угол сноса, град; УК — условный курс, град. Диапазоны изменения исходных данных следующие:

$$\text{ЗУПУ} = 0 \dots 360^\circ; \sigma = 0 \dots 360^\circ;$$

$$V = 0 \dots 900 \text{ км/ч}; U = 0 \dots 250 \text{ км/ч}.$$

Поскольку решение навигационных задач осуществляется в реальном масштабе времени, то при оценивании качества решения необходимо учиты-

- Экспертные значения оценки качества выполнения задачи
- Expert quality evaluation value of the task execution

| Время, с | Количество ошибок | | | |
|----------|-------------------|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0...70 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 71...95 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 96...120 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 120... | 2 | 2 | 2 | 2 |

вать не только точность, но и скорость выполнения поставленной задачи. В таблице приведены экспертные значения оценки с учетом времени и точности выполнения задачи по расчету условного курса на следующий этап полета.

При формировании эталонной модели решения задачи обучающая программа использует следующие формулы решения:

— для расчета угла ветра

$$\begin{cases} \sigma - \text{ЗУПУ} & \text{при } UV > 0 \\ 360 + \sigma - \text{ЗУПУ} & \text{при } UV < 0 \end{cases}$$

— для расчета угла сноса формула разбивается на ряд простых действий:

$$\begin{aligned} x_1 &= U/V; \\ x_2 &= \arcsin(U/V); \\ x_3 &= \sin(UV); \\ UC &= x_2 x_3. \end{aligned}$$

Условный курс рассчитывается по формуле $УК = \text{ЗУПУ} - UC$.

Построение бинарного дерева

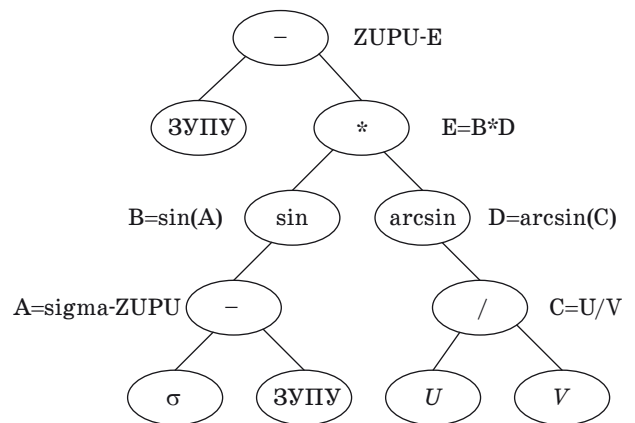
В памяти компьютера формула расчета условного курса на следующий этап полета

$$УК_{с.э} = \text{ЗУПУ} - \sin(\sigma - \text{ЗУПУ}) * \arcsin(U/V) (*)$$

будет представляться в следующем виде (рис. 1).

Поскольку одна и та же символьная информация, представленная на языке естественно-математической записи, может быть описана различными семантически эквивалентными выражениями, то требуется преобразовать бинарное дерево к стандартному виду, для чего необходимо:

- исключить все лишние скобки и унарные плюсы;
- раскрыть скобки, относящиеся к бинарному и унарному минусу;



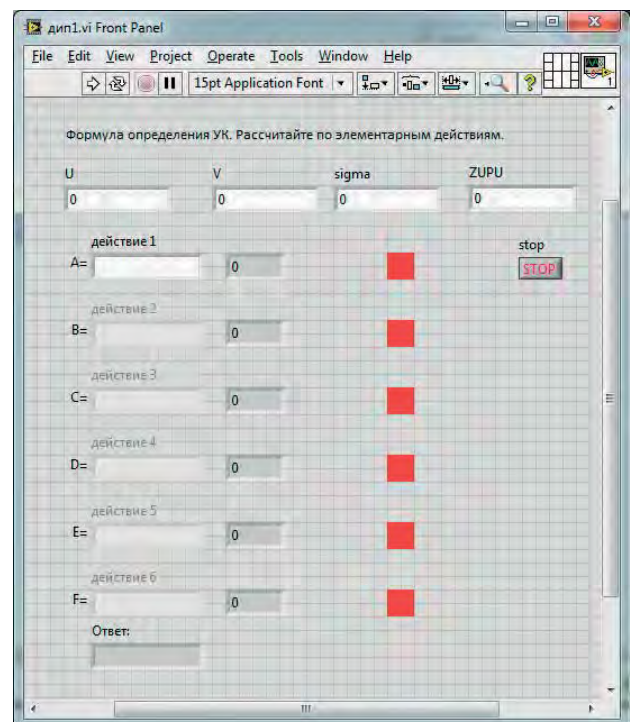
■ Рис. 1. Построение бинарного дерева

■ Fig. 1. Construction of a binary tree

- вынести унарный минус из-под знаков умножения и деления;
- если возможно, раскрыть скобки, охватывающие делитель.

Описание интерфейса диагностирующей программы

На рис. 2 показан графический интерфейс разработанной диагностирующей программы. Дан-

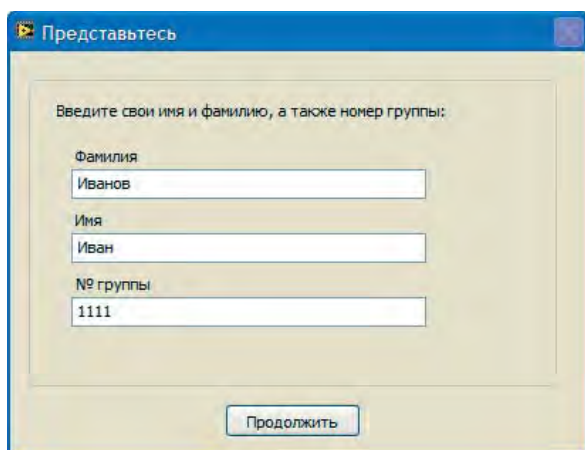


■ Рис. 2. Графический интерфейс диагностирующей программы

■ Fig. 2. Graphical interface of the diagnostic program

ная программа реализует задачный подход при обучении оператора-навигатора и построена в среде графического программирования LabVIEW.

При первом запуске программы появляется диалоговое окно, в котором необходимо указать личные данные обучаемого (рис. 3). После сохранения пользовательских данных, в ячейках исходных данных (см. рис. 2) обучаемым вручную задаются значения переменных (U, V, sigma, ZUPU) в опре-



■ **Рис. 3.** Диалоговое окно сохранения личных данных пользователя

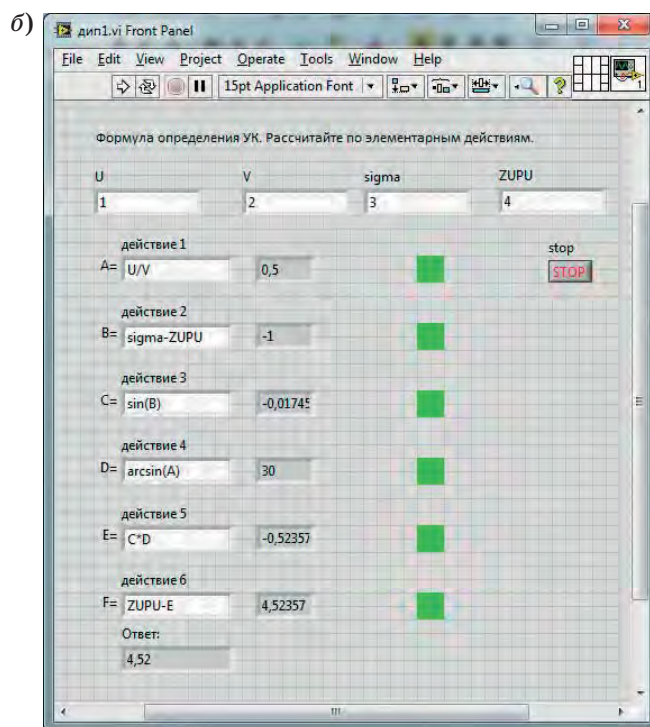
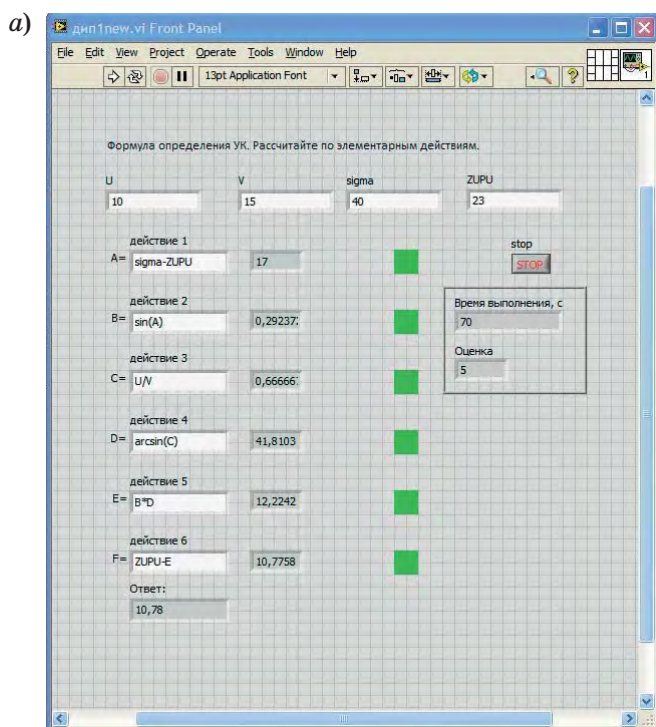
■ **Fig. 3.** User data saving dialog box

деленных, установленных преподавателем, пределах. В столбце ячеек действий (A, B, C, D, E, F) обучаемый вводит отдельные элементы формулы (*) нахождения УК. По ходу решения программа выводит численные значения параметров в столбце ячеек справа и выставляет обучаемому оценку.

В результате правильного введения элемента формулы система укажет зеленым светом индикатора тот шаг, на котором был осуществлен правильный ввод, и позволит перейти к следующему этапу.

При неправильном введении элемента формулы система укажет красным светом индикатора тот шаг, на котором допущена ошибка, и до устранения ошибки не позволит перейти к следующему этапу выполнения задания.

В полях ввода «действие 1», «действие 2» и т. д. следует поэтапно расписать процесс вычисления. Для «действие 1», например, можно записать «U/V» либо «sigma-ZUPU» (см. рис. 1). Таким образом, формула (*) разбивается на простейшие математические операции. Программа инвариантна к очередности вычислений, однако она осуществляет контроль правильности набранных выражений и проверяет, может ли быть вычислен текущий параметр при условии вычисления предыдущих. Если все операции выполнены правильно, то результат должен выглядеть так, как указано на рис. 4, а. Поскольку программа инвариантна по



■ **Рис. 4.** Процесс правильного (а) и альтернативного (б) решения задачи по расчету УК на следующий этап полета

■ **Fig. 4.** The process of correct (a) and alternative (б) solving the task of calculating the conditional course for the next stage of the flight

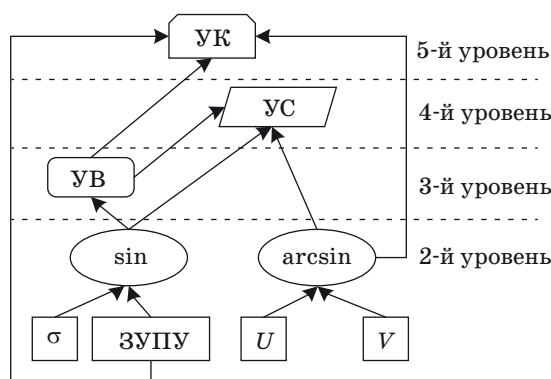
отношению к очередности ввода, то возможны и альтернативные решения задачи (рис. 4, б).

При условии, что численные значения исходных данных предварительно занесены в поля ввода U , V , σ , $ZUPU$, при правильном и корректном (с точки зрения синтаксиса математической операции) вводе напротив каждого действия отобразится его промежуточное численное значение. При правильном решении задачи в ячейке «Ответ» выводится искомое значение $УК$. В формате HTML (рис. 5) сохраняется отчет о выполнении задания, в котором указывается время выполнения и проставляется оценка в 4-балльной шкале оценивания [5]. Сформированный отчет может быть распечатан пользователем или же отправлен для анализа преподавателю по Интернету.

Стоит также отметить, что бинарное дерево (см. рис. 1) может быть рассмотрено как семантический граф, использование которого позволяет осуществлять ранжирования сложности отдельных операций при решении задачи о вычислении $УК$ на следующий этап полета. Семантический граф (семантическая сеть) (рис. 6) представляет собой связанный ориентированный мультиграф $G(C, E)$, вершинами которого являются концепты множества C , а дугами — отношения множества E [6].

Различают:

— входные концепты — понятия или же определения дисциплины (U , V , $ZUPU$ и σ);



■ Рис. 6. Семантический граф
■ Fig. 6. Semantic graph

— внутренние концепты, которые используются для определения других понятий курса и являются следующим уровнем графа;

— выходные концепты — понятия, не используемые для определения других понятий курса.

Очевидно, что концепт, связанный с большим количеством других концептов, позиционируется как более сложный [6]. В нашем конкретном случае действия, ориентированные на знания входных концептов U , V , $ZUPU$ и σ , считаются наиболее простыми; это, как правило, определения и понятия в рамках рассматриваемой темы («Расчет условного курса на следующий этап полета»), соответственно, данным действиям присваивается наименьший вес. Действия, ориентированные на знания концептов высших уровней: 2 — на знание тригонометрических функций и их отношений, 3 — понятие об угле ветра, расчет его направления, 4 — угол сноса и 5 — условный курс и его расчет, — считаются более сложными и, как следствие, имеют больший вес.

Таким образом может быть оценена сложность каждого из действий при расчете формулы (*), а также при использовании аппарата нечеткой логики — степень приближения ответа обучаемого к эталону (за счет использования меры Хемминга) [7].

Данный подход позволяет адаптировать процесс решения поставленной задачи для каждого конкретного обучаемого как с точки зрения временных затрат, так и по количеству неудачных попыток решения.

Анализ адекватности и эффективности адаптивного контроля навигационных умений

Разработанная авторами статьи программа, реализующая задачный подход, была апробирована при тестировании группы студентов III кур-

Студент: Иван Иванов
Номер группы: 1111

| дата | запись | решение | правильно? |
|---------------------|------------|---------|------------|
| 13.06.2012 19:40:00 | sigma-ZUPU | 17 | ДА |
| 13.06.2012 19:40:13 | sin(A) | 0 | ДА |
| 13.06.2012 19:40:23 | U/V | 1 | ДА |
| 13.06.2012 19:40:34 | arcsin(C) | 42 | ДА |
| 13.06.2012 19:40:40 | B*D | 12 | ДА |
| 13.06.2012 19:40:47 | ZUPU-E | 11 | ДА |

Время выполнения задания: 70 секунд
Оценка за задание: 5

■ Рис. 5. Отчет о выполнении задания
■ Fig. 5. Task implementation report

са Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) по дисциплине «Бортовые вычислительные комплексы навигации и самолетовождения» на тему «Расчет условного курса на следующий этап полета».

Результаты тестирования представлены на графике (рис. 7). Производилась оценка адекватности рассмотренного подхода, в результате которой установлено, что процент совпадения оценки преподавателя и разработанной программы по серии из 19 статистик составил 95 %.

Использование разработанной программы на базе заданного подхода в обучающем процессе позволяет:

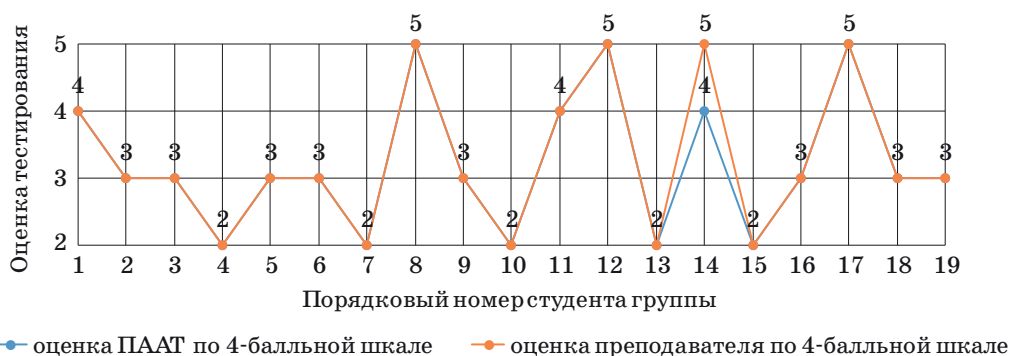
- автоматизировать процесс контроля и диагностики знаний обучаемого;
- разгрузить преподавателя от монотонных технологических операций, связанных с проверкой практических заданий;
- исключить предвзятое отношение со стороны преподавателя при выставлении оценки;

- организовать систему самодиагностики знаний при организации внеаудиторной подготовки;
- реализовать дистанционное обучение.

Стоит отметить, что важным недостатком спроектированных таким образом программ автоматизированного адаптивного тестирования (ПААТ) часто является низкая степень адаптации к индивидуальным психофизиологическим особенностям обучаемых, взаимодействующих с системой [8].

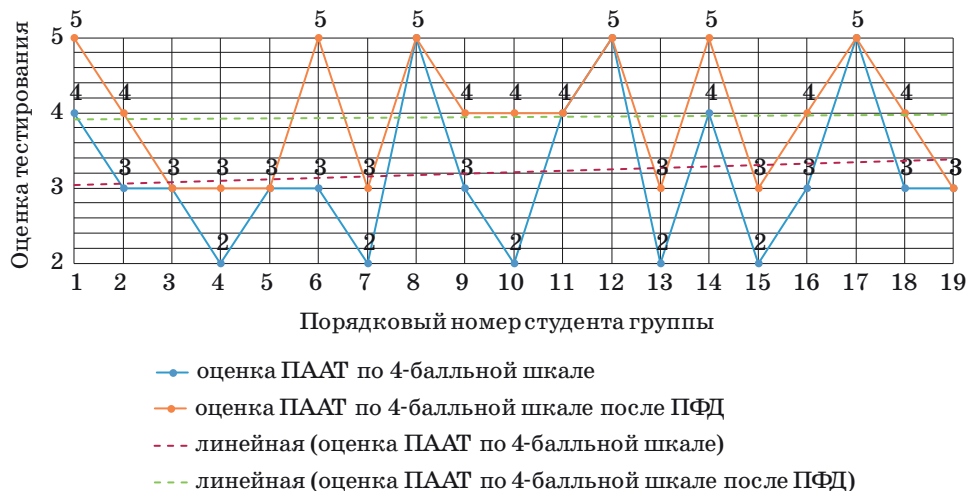
Для преодоления этого недостатка авторами статьи предложено внедрить в ПААТ систему психофизиологической диагностики (ПФД) обучаемых [8, 9].

На основании тестирования индивидуальных психофизиологических характеристик обучаемых по трем независимым методикам осуществляется процедура осреднения результатов, вследствие которой обучаемые подразделяются на четыре группы по типу нервной системы [8, 9]. Для каждой группы устанавливаются соответствующие временные параметры системы



■ Рис. 7. Результаты адаптивного тестирования навигационных умений

■ Fig. 7. Results of adaptive testing of navigational skills



■ Рис. 8. Результаты адаптивного тестирования навигационных умений после проведения ПФД

■ Fig. 8. Results of adaptive testing of navigational skills after psychophysiological diagnostics

контроля умений: время ответа на вопрос и число попыток при ответе, — что обеспечивает индивидуализацию процедуры контроля умений [9].

Повторный эксперимент после проведения ПФД по алгоритмам, методикам и программам, подробно рассмотренным в работе [9], доказал (рис. 8), что после проведения ПФД текущая успеваемость группы увеличилась за счет задания адаптивных временных диапазонов, отводимых для тестирования. В данном конкретном случае диапазоны задавались в соответствии с результатами тестирования психофизиологических характеристик обучаемых, полученными на основании научных выводов статьи [9].

Сравнивая полученные результаты, отметим, что при организации ПФД средняя оценка по 4-балльной шкале составила 3,95 по сравнению со средним значением 3,2, полученным по результатам тестирования, не учитывающим ПФД.

Наличие в составе ПААТ системы тестирования психофизиологических характеристик позволяет адаптировать обучающую систему к индивидуальным характеристикам обучаемого за счет задания временных параметров системы контроля знаний, что обеспечивает адекватную оценку знаний и повышает качество обучения.

Дальнейшие исследования адекватности и целесообразности использования задачного подхода

в обучении оператора-навигатора направлены на придание подходу адаптивности [10] с точки зрения задания различных временных диапазонов, соответствующих уровню успеваемости обучаемых. Также целесообразно рассмотреть возможность использования нечетких шкал оценивания [11] и реализации интеллектуальной диагностики на базе искусственных нейронных сетей [12].

Заключение

Разработанная система диагностики навигационных умений на базе задачного подхода с использованием вывода на аппарате бинарных деревьев с графосемантическим ранжированием сложности отдельных действий при решении обучаемым задач использована в учебном процессе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре аэрокосмических приборов и измерительно-вычислительных комплексов. Система обеспечивает объективность и безошибочность диагностики знаний и умений обучаемых, а также может быть эффективно использована при реализации внеаудиторной подготовки.

Литература

1. Суховиенко Е. А. Информационные технологии педагогической диагностики: теория и практика. — Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 2005. — 238 с.
2. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам/ пер. с англ. под ред. В. Л. Стефанюка. — М.: Мир, 1989. — 388 с.
3. Knuth D. E. The Art of Computer Programming. Vol. 1. Fundamental Algorithms. 3rd Ed. — Redwood City: Addison Wesley, 1997. — 672 p.
4. Stroustrup B. The C++ Programming Language. 4th Ed. — Addison Wesley Professional, 2013. — 1368 p.
5. Васильев В. И., Тягунова Т. Н., Хлебников В. А. Триадная сущность шкалы оценивания // Дистанционное образование. 2000. № 6. С. 19–25.
6. Лаптев В. В. Модель предметной области и оценка ее сложности в обучающей системе по программированию // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 35–44.
7. Рудинский И. Д. Модель нечеткого оценивания знаний как методологический базис автоматизации педагогического тестирования // Информационные технологии. 2003. № 9. С. 46–51.
8. Григорьев А. П., Писаренко Е. С. Моделирование психофизиологического тестирования обучаемых высшей технической школы // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 26–29.
9. Григорьев А. П., Орлов А. А. Адаптация АОС к психофизиологическим особенностям обучаемых // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2014. С. 22–26.
10. Зайцева Л. В. Методы и модели адаптации к учащимся в системах компьютерного обучения // Образовательные технологии и общество. 2003. Т. 6. № 4. С. 204–211.
11. Дуплик С. В. Модель адаптивного тестирования на нечеткой математике // Открытое и дистанционное образование. 2004. № 4. С. 78–88.
12. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd Ed. — Prentice-Hall, 1998. — 842 p.

UDC 004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.96

Operator-Navigator Activity Diagnostics System based on Task ApproachGrigoryev A. P.^{a,b}, Assistant Professor, Head of Design and Engineering Sector, alexgrid-1986@mail.ruBurlutsky S. G.^a, PhD, Tech., Associate Professor, sergey_burluckiy@mail.ruChernelevsky A. O.^{a,c}, M. Sc., Engineer, anatolij.chernelevskiy@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bJSC «Arsenal Design Bureau named after Mikhail Vasil'evich Frunze», 1–3, Komsomola St., 195009, Saint-Petersburg, Russian Federation^cPJSC «Techpribor», 5a, Varshavskaya St., 196084, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Computerization of educational process and the use of remote adaptive learning systems provide opportunities for inclusive continuous training of highly qualified personnel capable of solving a wide range of applied engineering tasks. Monitoring their knowledge and skills presumes continuous diagnostics of the learners. **Purpose:** Developing a navigational skill diagnostic system based on a task approach with binary-tree output and graphosemantic ranking of individual actions by their complexity when a learner is solving a typical practical problem. **Results:** We have formulated the major task solved by an expert diagnostic system during the training of aviation specialists, which is the diagnostics of their knowledge and practical skills. The graphosemantic approach allowed us to objectively rank individual actions of an operator when constructing a private semantic graph for the problem being solved by a learner. When creating and operating the remote adaptive learning system, binary trees allowed us to analyze all possible solutions to the problem and program the best solution on the basis of simple mathematical operations. Application of the above approaches with the help of fuzzy logic allowed us to propose a hypothesis about the possibility to calculate the degree of approximation between the learner's answer and the standard (correct) answer, thereby effectively evaluating his/her knowledge and skills at all stages of solving the problem. **Practical relevance:** The developed system provides the opportunity to reduce training time, intensify the learning process and increase the degree of mastering knowledge and skills. The load on the instructors and teachers decreases as they become free from a number of technological operations related to the processing and verification of the test results.

Keywords — Training of Aviation Specialists, Knowledge Control, Skill Diagnostics, Adaptive Training Systems, Task Approach, Semantic Graphs, Binary Trees, Adaptability.

Citation: Grigoryev A. P., Burlutsky S. G., Chernel'evsky A. O. Operator-Navigator Activity Diagnostics System based on Task Approach. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 96–103 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.96

References

1. Sukhoviev E. A. *Informatsionnye tekhnologii pedagogicheskoi diagnostiki: teoriya i praktika* [Information Technology Educational Assessment: Theory and Practice]. Cheljabinsk, Iuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 2005. 238 p. (In Russian).
2. Uotermen D. *Rukovodstvo po ekspertnym sistemam* [Guidelines for Expert Systems]. Moscow, Mir Publ., 1989. 388 p. (In Russian).
3. Knuth D. E. *The Art of Computer Programming*. Vol. 1. *Fundamental Algorithms*. 3rd Ed. Addison Wesley, 1997. 672 p.
4. Stroustrup B. *The C++ Programming Language*. 4th Ed. Addison Wesley Professional, 2013. 1368 p.
5. Vasil'ev V. I., Tiagunova T. N., Khlebnikov V. A. Triadic Nature of Assessment Scales. *Distantionnoe obrazovanie*, 2000, no. 6, pp. 19–25 (In Russian).
6. Laptev V. V. Domain Model and Estimation of its Complexity in the Training System for Programming. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Newsletter of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2010, no. 2, pp. 35–44 (In Russian).
7. Rudinskii I. D. Model of Fuzzy Evaluation of Knowledge as a Methodological Basis of Pedagogical Testing Automation. *Informatsionnye tekhnologii*, 2003, no. 9, pp. 46–51 (In Russian).
8. Grigoryev A. P., Pisarenko Ye. S. Modeling of Psychophysiological Testing of Students of Higher Technical School. *Sbornik dokladov nauchnoi sessii GUAP* [Collection of Presentations at the Scientific Session of the SUAI]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 26–29 (In Russian).
9. Grigoryev A. P., Orlov A. A. Adaptation of Adaptive Training Systems to Psychophysiological Features of Trainees. *Sbornik dokladov nauchnoi sessii GUAP* [Collection of Presentations at the Scientific Session of the SUAI]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 22–26 (In Russian).
10. Zaytseva L. V. Methods and Models of Adaptation to Students in the Computer-Based Learning Systems. *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* [Educational Technology and Society], 2003, vol. 6, no. 4, pp. 204–211 (In Russian).
11. Duplik S. V. Model of Adaptive Testing on Fuzzy Math. *Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie*, 2004, no. 4 (16), pp. 78–88 (In Russian).
12. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd Ed. Prentice-Hall, 1998. 842 p.

МЕТОД ФОРМАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «МАШИНА ПОСТА»

А. В. Лямин^а, канд. техн. наук, доцент, lyamin@mail.ifmo.ru

^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

Введение: формальная верификация программ в символьном виде позволяет в автоматическом режиме осуществлять оценку практических навыков обучающихся при наличии неразрешимого множества верных ответов, что существенно облегчает разработку программных компонентов, используемых для оценки. **Цель:** разработка нового метода формальной верификации программ в символьном виде для виртуальной лаборатории «Машина Поста». **Результаты:** разработан новый метод формальной верификации программ в символьном виде для виртуальной лаборатории «Машина Поста». Сформулированы основные принципы и примеры формирования программ для машины Поста и методы их символьной формализации. Рассмотрены различные задачи использования математических операций с представленными на ленте машины числами в унарном коде, в частности: прибавление единицы к числу, сложение и умножение двух чисел, остановка работы программы в определенной конфигурации ленты машины, переход к новой конфигурации машины от первоначально заданной. Рассмотренных задач достаточно для формирования у обучающихся базовых практических навыков алгоритмизации, а символьное представление решения таких задач позволит упростить разработку оценивающих средств виртуальной лаборатории «Машина Поста» и осуществлять контроль формирования данных навыков в автоматическом режиме. Представлена концепция внедрения разработанного метода верификации программ в уже существующие обучающие информационные системы. **Практическая значимость:** разработанный метод формальной верификации программ для виртуальной лаборатории «Машина Поста» позволяет осуществлять оценку практических навыков алгоритмизации задач у обучающихся и упростить разработку виртуальных лабораторий путем уменьшения затрат на формирование тестовых наборов данных для проведения оценивающих мероприятий.

Ключевые слова — информационные системы, электронное обучение, виртуальные лаборатории, формальная верификация программ.

Цитирование: Лямин А. В. Метод формальной верификации программ для виртуальной лаборатории «Машина Поста» // Информационно-управляющие системы. 2018. № 2. С. 104–114. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.104

Citation: Lyamin A. V. Method of Formal Program Verification for Post Machine Virtual Laboratory. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 104–114 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.104

Введение

Формирование практических навыков у обучающихся в ходе образовательного процесса всегда было одной из первоочередных задач образовательных организаций. В связи с развитием современного образования, в частности электронного обучения, широкое распространение получили виртуальные лаборатории [1, 2], представляющие собой программные компоненты электронных информационно-образовательных сред, доступные для обучающихся. Развитие современного образования способствует созданию большого числа массовых открытых онлайн-курсов [3–5], реализующих обучение в электронной среде. В этом случае использование виртуальных лабораторий является наиболее перспективным методом формирования практических навыков обучающихся и их оценивания.

С развитием технологий появилось множество различных типов виртуальных лабораторий, которые могут быть разделены на три классификационные группы в соответствии с их основными характеристиками.

Первая классификационная группа определяет типы лабораторий в зависимости от их

программной реализации. Автономные виртуальные лаборатории [6] представляют собой специализированное программное обеспечение, устанавливаемое на пользовательские рабочие станции и не требующее сетевого подключения к сети Интернет. Одним из недостатков такой реализации является невозможность постоянного сохранения данных о выполненных работах. Клиент-серверные виртуальные лаборатории [7] предоставляют доступ обучающимся к лаборатории через веб-браузер и требуют от клиентской станции сетевого подключения, что позволяет осуществлять сбор необходимых сведений об активности обучающихся при выполнении заданий лаборатории в оперативном режиме.

Вторая классификационная группа разделяет виртуальные лаборатории в зависимости от их аппаратной реализации. Использование виртуальных лабораторий с доступом к физическому оборудованию [8] существенно снижает стоимость разработки программного обеспечения, однако требует увеличения расходов на сопровождение. Использование математических моделей при разработке [9] потребует усложнения архитектуры программного обеспечения виртуальной

лаборатории, однако в то же время существенно снизит затраты на покупку и поддержку функционирования оборудования.

Третья классификационная группа включает виртуальные лаборатории, реализующие возможность автоматической проверки ответов обучающихся [10]. Возможность автоматизированной проверки позволяет с легкостью использовать виртуальные лаборатории в качестве одного из основных инструментов оценивания в массовых открытых онлайн-курсах. В то же время виртуальные лаборатории могут иметь неразрешимое множество правильных ответов, в отличие от стандартных инструментов оценивания, таких как электронные тесты. Для таких заданий правильный ответ не может быть описан конечным множеством или общерекурсивной характеристической функцией, что делает задачу автоматизации проверки таких решений актуальной в рамках развития современного образования. Верификация программ в символьном виде является одним из наиболее перспективных методов решения поставленной задачи. В данной статье описывается созданный метод формальной верификации программ в символьном виде для виртуальной лаборатории «Машина Поста».

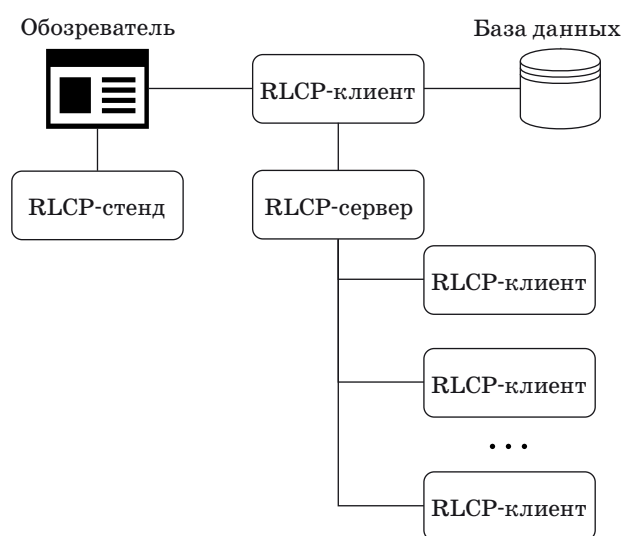
Управление удаленной лабораторией

Один из основных способов верификации результатов прохождения заданий виртуальной лаборатории с неразрешимым множеством правильных ответов представлен верификацией результатов на основе наборов входных и выходных данных. В этом случае ответ обучающегося на представленное ему в рамках виртуальной лаборатории задание содержит описание некоторой системы с установленным набором входов и выходов. Система строится на виртуальном стенде, представляющем собой пользовательскую часть виртуальной лаборатории, встраиваемую в информационно-образовательную среду. На виртуальном стенде отображается представление системы в визуальной форме, а также задание, предназначенное для выполнения. В описанном случае правильный ответ на конкретную поставленную задачу представляется в формате пар эталонных наборов входов и выходов, которые используются для оценки корректности ответа обучающегося после завершения им работы с виртуальной лабораторией. Ответ считается правильным, если реакция системы при проверке на заданных входных данных выдает результат в виде соответствующего ему эталонного набора выходных данных. Для анализа реакции системы, описанной обучающимся в ответе, на заданных эталонных наборах данных использу-

ется виртуальная машина. При этом информационно-образовательная среда обеспечивает организацию взаимодействия виртуального стенда с виртуальной машиной, формирование заданий и эталонных наборов входных и выходных данных, формирование протоколов по результатам действий обучающегося в рамках виртуального стенда и полученных им результатов.

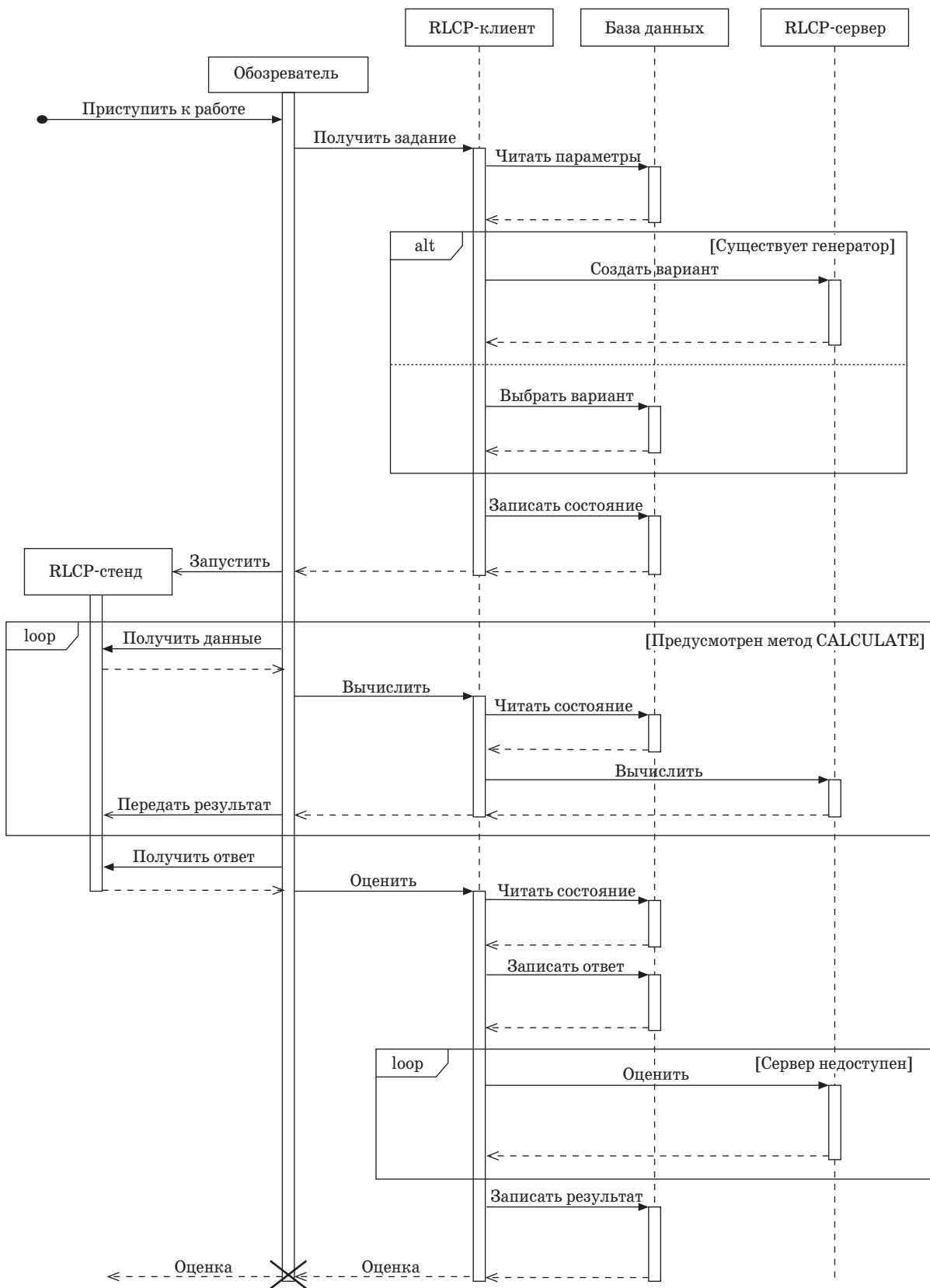
Виртуальные лаборатории представляют собой программные компоненты информационно-образовательной среды, нацеленные на отдельные предметные области. Для унификации механизма доступа к различным виртуальным лабораториям и работы с ними был разработан метод управления удаленной лабораторией, реализованный в протоколе управления удаленной лабораторией RLCP (Remote Laboratory Control Protocol) [11–13]. В протоколе RLCP определяются требования к виртуальному стенду и виртуальной машине, использующимся для построения виртуальных лабораторий; описывается схема взаимодействия между различными компонентами информационно-образовательной среды в процессе формирования задания и его выполнения в целом; описывается механизм проверки результата выполнения заданий виртуальной лаборатории обучающимся. Общая схема построения RLCP-совместимых виртуальных лабораторий приведена на рис. 1.

Виртуальный стенд RLCP-совместимой виртуальной лаборатории называется RLCP-стендом, виртуальная машина — RLCP-сервером. RLCP-клиент представляется в виде контроллера информационно-образовательной среды. Он реали-



■ Рис. 1. Схема построения RLCP-совместимых виртуальных лабораторий

■ Fig. 1. Scheme of building RLCP-compatible virtual laboratories



■ **Рис. 2.** Диаграмма последовательности выполнения лабораторной работы с использованием RLCP-совместимой виртуальной лаборатории
 ■ **Fig. 2.** Sequence diagram of passing an assignment using RLCP-compatible virtual laboratory

зует взаимодействие с обозревателем по протоколу HTTP или HTTPS и с RLCP-сервером с использованием протокола RLCP. Доступ к базе данных выполняется с помощью программного интерфейса RLCP-клиента. Взаимодействие RLCP-стенда с обозревателем проводится за счет программного интерфейса RLCP-стенда.

После взаимодействия обучающегося с интерфейсом информационно-образовательной среды по его инициативе выполняется отправка обозревателем RLCP-клиенту HTTP-запроса на получение задания для виртуальной лаборатории (рис. 2). В RLCP предусмотрен метод генерирования задания виртуальной лаборатории GENERATE [14] на основе некоторого базового шаблона с динамической подстановкой варьирующихся значений. После считывания параметров виртуальной лаборатории RLCP-клиент формирует вариант задания с использованием метода GENERATE или же выбирает готовый вариант из существующего набора, хранящегося в базе данных, в зависимости от наличия генератора заданий для конкретной виртуальной лаборатории. Сформированный вариант задания виртуальной лаборатории фиксируется RLCP-клиентом в базе данных для последующей оценки ответа обучающегося, после чего вариант преобразуется в веб-страницу, содержащую вариант задания и RLCP-стенд, и отправляется обозревателю. Путем взаимодействия с RLCP-стендом обучающийся выполняет задание виртуальной лаборатории. При необходимости обучающийся получает возможность использовать ресурсы RLCP-сервера для выполнения сложных вычислений или предварительной проверки текущего решения работы. Данная функция реализуется в методе RLCP-CALCULATE. Разрешение использовать данный метод должно быть установлено регламентом проведения лабораторной работы. По завершении выполнения задания обучающийся подтверждает готовность решения путем инициализации отправки решения на проверку. В этом случае обозреватель получает данные решения обучающегося из RLCP-стенда и отправляет их RLCP-клиенту в виде HTTP-запроса. Решение оценивается RLCP-сервером после отправки ему RLCP-клиентом с использованием метода CHECK информации из базы данных, необходимой для выполнения процедуры оценивания работы. В случае невозможности обработки RLCP-сервером информации в конкретный момент, RLCP-клиент продолжает отправку данных до получения ответа от сервера. После завершения обработки результаты оценивания фиксируются в базе данных и становятся доступны обучающемуся.

Любое взаимодействие по протоколу RLCP инициализируется RLCP-клиентом, поэтому данный протокол является асимметричным. После-

довательность взаимодействия можно представить в следующем виде:

- 1) установление TCP-соединения;
- 2) отправка запроса RLCP-клиентом (запрос содержит строку состояния с названием метода RLCP, поля заголовка, пустую строку, тело запроса);
- 3) отправка ответа RLCP-сервером;
- 4) разрыв TCP-соединения.

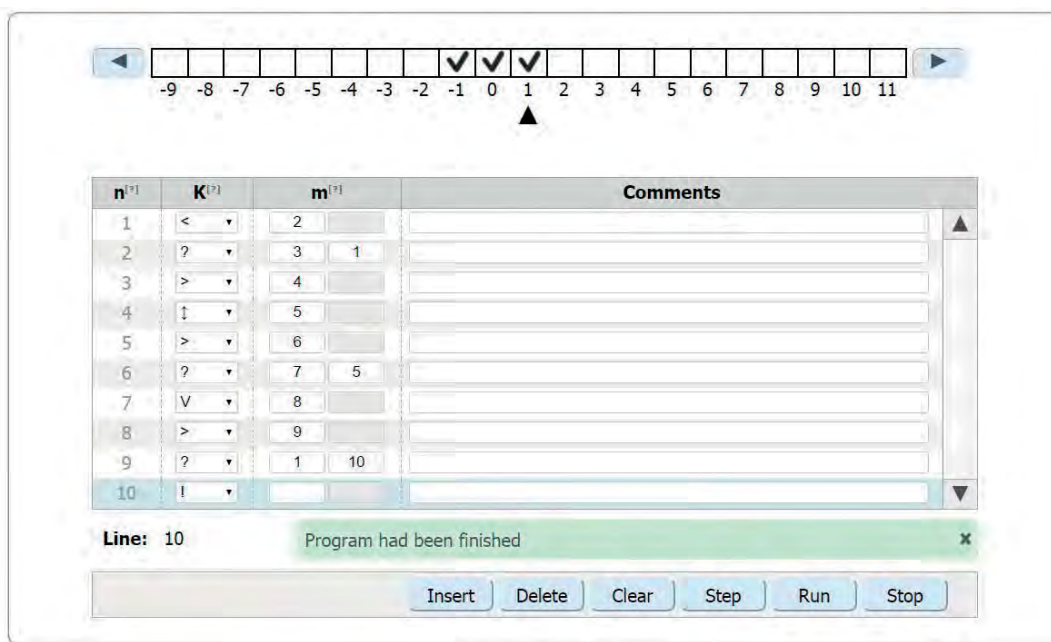
Виртуальная лаборатория «Машина Поста»

Абстрактные алгоритмические машины являются одним из основных инструментов формирования базовых навыков решения алгоритмических задач в информатике. Виртуальные лаборатории, моделирующие такие машины, позволяют обучающимся сформировать необходимые навыки алгоритмизации [15] задач путем использования виртуального стенда лаборатории, визуализирующего конкретную абстрактную машину. Машина Поста [16] является одной из абстрактных алгоритмических машин, введенных для формализации понятия «алгоритм». Данный тип абстрактных машин удобен для формирования базовых навыков алгоритмизации и оценивания навыков анализа алгоритмов, поскольку использование машины Поста не требует знания сложных языков программирования и подходит для применения обучающимися с любым уровнем знаний. В автоматизированной системе управления процессом электронного обучения AcademicNT была разработана и размещена в системе RLCP-совместимая виртуальная лаборатория, моделирующая работу машины Поста [13].

RLCP-стенд лаборатории включает несколько основных компонент: бесконечную ленту, на которой размещены ячейки для хранения информации; редактор команд машины; область для вывода сопутствующей информации, в том числе номера текущей выполняемой команды и системных сообщений; элементы управления виртуальным стендом. В случае возникновения ошибок или успешного завершения выполнения программы виртуальный стенд выдает соответствующие сообщения. Интерфейс виртуального стенда лаборатории «Машина Поста» представлен на рис. 3.

Для обучающегося при взаимодействии с виртуальным стендом доступны следующие действия:

- установка метки в неотмеченную ячейку;
- снятие метки с отмеченной ячейки;
- перемещение ленты машины вправо и влево;



■ Рис. 3. RLCP-стенд виртуальной лаборатории «Машина Поста»
 ■ Fig. 3. RLCP-stand of Post machine virtual laboratory

- Перечень команд машины Поста
- List of Post machine commands

| Команда | Описание |
|-------------------|---|
| $n \rightarrow m$ | Сдвиг каретки вправо, переход к команде с номером m |
| $n \leftarrow m$ | Сдвиг каретки влево, переход к команде с номером m |
| $n \vee m$ | Установка метки, переход к команде с номером m |
| $n \times m$ | Снятие метки, переход к команде с номером m |
| $n ? m_1, m_2$ | Если ячейка не отмечена — переход к команде с номером m_1 , иначе — переход к команде с номером m_2 |
| $n !$ | Команда остановки |

— ввод / редактирование команды nKt в редакторе команд, где n — номер текущей команды, K — операция машины Поста (описание полного списка операций приведено в таблице), t — номер следующей команды;

— выполнение управляющих операций: добавление / удаление команд, снятие меток со всех отмеченных ячеек на ленте, запуск программы в пошаговом режиме, запуск программы на выполнение, остановка режима пошагового выполнения.

Метод формальной верификации программ

Использование виртуальных лабораторий в образовательном процессе позволяет обучающимся сформировать необходимые в конкретной предметной области практические навыки, а также служат инструментом их оценивания. Однако множество правильных ответов на задания виртуальных лабораторий в подавляющем большинстве случаев является алгоритмически неразрешимым [17], что усложняет процесс разработки соответствующего программного и методического обеспечения. Обучающийся в ходе выполнения задания виртуальной лаборатории описывает определенную систему, имеющую множество входов и выходов. Таким образом, одним из способов верификации правильности результатов выполнения работы является формирование эталонных наборов входных и выходных данных, для которых осуществляется проверка функционирования описанной обучающимся системы. Однако невозможно сформировать множество наборов эталонных данных, поскольку в большинстве случаев данное множество также является неразрешимым, а ограничение оценивания на наиболее характерных наборах данных не гарантирует правильность работы системы на других наборах. Для решения поставленной проблемы может быть применен метод символического выполнения [18–20] как один из наиболее эффективных методов оценки в указанном случае.

В рамках данной работы был разработан метод формальной верификации программ в сим-

вольном виде для виртуальной лаборатории «Машина Поста». Машина Поста представляет собой простейшую алгоритмическую машину и имеет бинарный алфавит. Как было описано выше, виртуальный стенд лаборатории «Машина Поста» имеет бесконечную в обе стороны ленту, а также каретку, указывающую на текущую обозреваемую ячейку ленты. Ячейки ленты могут находиться в двух состояниях — быть пустыми (0) или содержать метку (1), таким образом, общее состояние ленты определяется набором значений (словом из нулей и единиц), содержащихся на ленте в конкретный момент времени. В начальный момент времени только конечное количество ячеек содержит метку, остальные остаются пустыми. Язык, описывающий состояния ленты машины Поста, можно определить регулярным выражением $\varepsilon + 1 + 1(0 + 1)^*1$, где ε — пустая цепочка. Для полного описания состояния машины необходимо ввести состояние каретки, указывающей на определенную ячейку. Таким образом, состояние машины определяется тройкой значений $\alpha_1\Lambda\alpha_2$, где α_1 — слово, определяющее состояние фрагмента ленты, расположенного слева от каретки; Λ — символ, обозначающий положение каретки; α_2 — слово, определяющее состояние фрагмента ленты, образованного обозреваемой ячейкой и ячейками, находящимися справа от нее. Стандартная конфигурация машины представляет собой конфигурацию, при которой каретка обозревает крайнюю слева отмеченную ячейку — $\Lambda\alpha$, где α — слово, определяющее состояние ленты.

В соответствии с обозначенным выше перечнем команд машины Поста, список команд состоит из следующих: $i > j$, $i < j$, $i \vee j$, $i \times j$, $i ? j_1 j_2$, $i !$ — где i — номер текущей выполняемой команды; j, j_1, j_2 — номера команд, которым передается управление после выполнения текущей команды. Общее количество программы F обозначим как $|F|$. Правильная команда для машины Поста не должна содержать ссылки на неопределенные в коде команды. В ходе выполнения программы могут произойти следующие события:

1) машина перейдет к невыполнимой команде (команде установки / снятия метки или неопределенной команде) — выполнение программы завершается, остановка считается безрезультатной;

2) достигается команда остановки — выполнение программы завершается, остановка считается результативной;

3) выполнение программы не завершается, машина работает бесконечно.

Обозначим переход между конфигурациями машины как $K_1 \xrightarrow{i} K_2$, где K_1 — начальная конфигурация машины; K_2 — конечная конфигурация; i — команда, благодаря которой произошел переход. Если конфигурация машины измени-

лась после выполнения программы F , содержащей последовательность команд $S = (i_1, i_2, \dots, i_{n-1})$, где $1 \leq i_j \leq |F|$, $j = 1, 2, \dots, n - 1$, то обозначим это как $K_1 \xrightarrow{S} K_2$. В ходе выполнения программы F

машина перерабатывает слово $\alpha_1\alpha_2$ в слово $\beta_1\beta_2$: $F(\alpha_1\alpha_2) = \beta_1\beta_2$. Рассмотрим несколько примеров программ при условии, что выполнение программы начинается из описанной ранее стандартной конфигурации.

1. *Базовые правила вычислений программ машины Поста в символьном виде.*

Пусть $a \in \Sigma \cup \{\varepsilon\}$, $\alpha, \beta \in \Sigma^*$, $x, y \in \mathbb{N}$, где $\Sigma \in \{0, 1\}$ — двоичный алфавит, ε — пустой символ, тогда:

- | | |
|--|--|
| 1) $a^0 = \varepsilon$ | 9) $\alpha a \beta \xrightarrow{i < j} \alpha \Lambda a \beta$ |
| 2) $a^1 = a$ | 10) $\alpha \Lambda 0 \beta \xrightarrow{i \vee j} \alpha \Lambda a \beta$ |
| 3) $\alpha^0 = \varepsilon$ | 11) $\alpha \Lambda 1 \beta \xrightarrow{i \times j} \alpha \Lambda 0 \beta$ |
| 4) $\alpha^1 = \alpha$ | 12) $\alpha \Lambda 1 \beta \xrightarrow{i \vee j} \varepsilon$ |
| 5) $\alpha 0^x = 0^x \alpha = \alpha$ | 13) $\alpha \Lambda 0 \beta \xrightarrow{i \times j} \varepsilon$ |
| 6) $a^x a^y = a^y a^x = a^{x+y}$ | 14) $\alpha \Lambda \beta \xrightarrow{i ? j_1, j_2} \alpha \Lambda \beta$ |
| 7) $\alpha^x \alpha^y = \alpha^y \alpha^x = \alpha^{x+y}$ | 15) $\alpha \Lambda \beta \xrightarrow{i !} \alpha \Lambda \beta$ |
| 8) $\alpha \Lambda a \beta \xrightarrow{i > j} \alpha \Lambda a \beta$ | |

Пример 1. Рассмотрим программу, добавляющую к числу, записанному на ленте, единицу:

- 1 < 2
- 2 \vee 3
- 3 !

В рассматриваемых примерах числа на ленте представляются в унарном коде — число x будет представлено как $11\dots 1 = 1^x$. В случае размещения на ленте нескольких чисел x_1, x_2, \dots, x_n состояние ленты будет представлено в виде $1^{x_1} 0^{y_1} 1^{x_2} 0^{y_2} \dots 0^{y_{n-1}} 1^{x_n}$, где y_1, y_2, \dots, y_n — некоторые натуральные числа. Начальная конфигурация машины имеет вид $\Lambda 1^x$. После выполнения первой команды конфигурация машины перейдет к виду $\Lambda 0 1^x$. Поскольку вторая команда производит установку метки в обозреваемую ячейку, то конфигурация машины станет равной $\Lambda 1^{x+1}$, после чего происходит результативная остановка выполнения программы. Таким образом, становится возможным описать результат программы в символьном виде и восстановить функцию, определяемую программой.

2. *Правила вычисления циклов машины Поста в символьном виде.*

Пример 2. Рассмотрим пример программы, выполняющей сложение двух чисел, т. е. осуществляющей преобразование слова $1^{x_1} 0^{y_1} 1^{x_2}$ в $1^{x_1+x_2}$:

| | | |
|----------|-----------|------------|
| 1 > 2 | 7 > 8 | 13 > 14 |
| 2 ? 3 1 | 8 ? 7 9 | 14 ? 13 15 |
| 3 < 4 | 9 < 10 | 15 < 16 |
| 4 X 5 | 10 V 11 | 16 V 17 |
| 5 < 6 | 11 < 12 | 17! |
| 6 ? 13 7 | 12 ? 11 4 | |

В представленной программе происходит смещение левой последовательности меток к правой и тем самым формируется результирующая комбинация. Пусть начальная конфигурация машины $\Lambda^1 3^0 3^1 6$, тогда ход выполнения программы можно представить в виде

| | | |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| $\Lambda^1 3^0 3^1 6$ | 12: $1^2 0^2 \Lambda 0^1 7$ | 11: $10 \Lambda 0^2 1^8$ |
| 1: $1 \Lambda 1^2 0^3 1^6$ | 11: $1^2 0 \Lambda 0^2 1^7$ | 12: $10 \Lambda 0^2 1^8$ |
| 2: $1 \Lambda 1^2 0^3 1^6$ | 12: $1^2 0 \Lambda 0^2 1^7$ | 11: $1 \Lambda 0^3 1^8$ |
| 1: $1^2 \Lambda 10^3 1^6$ | 11: $1^2 \Lambda 0^3 1^7$ | 12: $1 \Lambda 0^3 1^8$ |
| 2: $1^2 \Lambda 10^3 1^6$ | 12: $1^2 \Lambda 0^3 1^7$ | 11: $1 \Lambda 10^3 1^8$ |
| 1: $1^3 \Lambda 0^3 1^6$ | 11: $1 \Lambda 10^3 1^7$ | 12: $1 \Lambda 10^3 1^8$ |
| 2: $1^3 \Lambda 0^3 1^6$ | 12: $1 \Lambda 10^3 1^7$ | 4: $\Lambda 0^4 1^8$ |
| 3: $1^2 \Lambda 10^3 1^6$ | 4: $1 \Lambda 0^4 1^7$ | 5: $\Lambda 0^5 1^8$ |
| 4: $1^2 \Lambda 0^4 1^6$ | 5: $\Lambda 10^4 1^7$ | 6: $\Lambda 0^5 1^8$ |
| 5: $1 \Lambda 10^4 1^6$ | 6: $\Lambda 10^4 1^7$ | 13: $\Lambda 0^4 1^8$ |
| 6: $1 \Lambda 10^4 1^6$ | 7: $1 \Lambda 0^4 1^7$ | 14: $\Lambda 0^4 1^8$ |
| 7: $1^2 \Lambda 0^4 1^6$ | 8: $1 \Lambda 0^4 1^7$ | 13: $\Lambda 0^3 1^8$ |
| 8: $1^2 \Lambda 0^4 1^6$ | 7: $10 \Lambda 0^3 1^7$ | 14: $\Lambda 0^3 1^8$ |
| 7: $1^2 0 \Lambda 0^3 1^6$ | 8: $10 \Lambda 0^3 1^7$ | 13: $\Lambda 0^2 1^8$ |
| 8: $1^2 0 \Lambda 0^3 1^6$ | 7: $10^2 \Lambda 0^2 1^7$ | 14: $\Lambda 0^2 1^8$ |
| 7: $1^2 0^2 \Lambda 0^2 1^6$ | 8: $10^2 \Lambda 0^2 1^7$ | 13: $\Lambda 0^1 8$ |
| 8: $1^2 0^2 \Lambda 0^2 1^6$ | 7: $10^3 \Lambda 0^1 7$ | 14: $\Lambda 0^1 8$ |
| 7: $1^2 0^3 \Lambda 0^1 6$ | 8: $10^3 \Lambda 0^1 7$ | 13: $\Lambda 1^8$ |
| 8: $1^2 0^3 \Lambda 0^1 6$ | 7: $10^4 \Lambda 1^7$ | 14: $\Lambda 1^8$ |
| 7: $1^2 0^4 \Lambda 1^6$ | 8: $10^4 \Lambda 1^7$ | 15: $\Lambda 0^1 8$ |
| 8: $1^2 0^4 \Lambda 1^6$ | 9: $10^3 \Lambda 0^1 7$ | 16: $\Lambda 1^9$ |
| 9: $1^2 0^3 \Lambda 0^1 6$ | 10: $10^3 \Lambda 1^8$ | 17: $\Lambda 1^9$ |
| 10: $1^2 0^3 \Lambda 1^7$ | 11: $10^2 \Lambda 0^1 8$ | |
| 11: $1^2 0^2 \Lambda 0^1 7$ | 12: $10^2 \Lambda 0^1 8$ | |

В представленном отображении каждая из строк имеет формат $i: \alpha$, где i — номер текущей завершенной команды, α — конфигурация машины после выполнения команды. В данной программе для выполнения определенных действий используются циклы, в частности:

| | | |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1: $1 \Lambda 1^2 0^3 1^6$ | 1: $1^2 \Lambda 10^3 1^6$ | 1: $1^3 \Lambda 0^3 1^6$ |
| 2: $1 \Lambda 1^2 0^3 1^6$ | 2: $1^2 \Lambda 10^3 1^6$ | 2: $1^3 \Lambda 0^3 1^6$ |

В представленном фрагменте повторно выполняются команды 1 и 2, осуществляющие перемещение каретки от начала левой последовательности меток к ее правому концу. Другим примером цикла является повтор команд 11 и 12, осуществляющих перемещение от левого края правой последовательности к правому краю левой, пока в обозреваемой ячейке не будет метки:

| | |
|-----------------------------|---------------------------|
| 11: $1^2 0^2 \Lambda 0^1 7$ | 11: $1^2 \Lambda 0^3 1^7$ |
| 12: $1^2 0^2 \Lambda 0^1 7$ | 12: $1^2 \Lambda 0^3 1^7$ |
| 11: $1^2 0 \Lambda 0^2 1^7$ | 11: $1 \Lambda 10^3 1^7$ |
| 12: $1^2 0 \Lambda 0^2 1^7$ | 12: $1 \Lambda 10^3 1^7$ |

Таким образом, можно сформулировать основные характеристики циклов:

1) остановка цикла происходит, если в ходе выполнения цикла уменьшается какая-либо повторяющаяся последовательность из нулей и единиц, записанных на ленте;

2) выполнение цикла продолжается до тех пор, пока уменьшающаяся последовательность не будет исчерпана;

3) цикл не завершается, если ни одна из последовательностей не убывает.

Эти правила позволяют вычислять результат циклов в символьном виде, завершающихся за конечное количество шагов.

Большинство задач для машины Поста предусматривают выполнение сложных операторов — циклов. Обозначим некоторый цикл как S , а также $a \in \Sigma \cup \{\varepsilon\}$, $b, c \in \Sigma$, $b \neq c$, $\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_n, \gamma_1, \dots, \gamma_m, \delta_1, \dots, \delta_m \in \Sigma^*$, $x_1, \dots, x_n, y, z_1, \dots, z_m \in \mathbb{N}$, где $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ — возрастающая функция, f^{-1} — обратная функция, $h_1, \dots, h_n, g_1, \dots, g_m: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$. Если $\Delta^k f = \Delta^k h_1 = \dots = \Delta^k h_n = \Delta^k g_1 = \dots = \Delta^k g_m = 0$, $y - f(k) = 0$, $x_1 + h_1(f^{-1}(y)) \geq 0, \dots, x_n + h_n(f^{-1}(y)) \geq 0$, $z_1 + g_1(f^{-1}(y)) \geq 0, \dots, z_m + g_m(f^{-1}(y)) \geq 0$, то в зависимости от направления движения цикла по командам определим следующие соотношения:

1) движение вправо

$$\begin{aligned} & \alpha_n^{x_n} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1} \beta_1 \Lambda b^y c^1 \gamma_1 \delta_1^{z_1} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m} \xrightarrow{S} \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(1)} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(1)} \beta_1 a^{f(1)} \Lambda \\ & \Lambda b^{y-f(1)} c^1 \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(1)} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(1)} \xrightarrow{S} \dots \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(k)} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(k)} \beta_1 a^{f(k)} \Lambda \\ & \Lambda b^{y-f(k)} c^1 \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(k)} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(k)} \xrightarrow{S} \dots \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(f^{-1}(y))} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(f^{-1}(y))} \beta_1 a^y \Lambda \\ & \Lambda c^1 \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(f^{-1}(y))} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(f^{-1}(y))}; \end{aligned}$$

2) движение влево

$$\begin{aligned} & \alpha_n^{x_n} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1} \beta_1 c^1 b^{x-1} \Lambda b^1 \gamma_1 \delta_1^{z_1} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m} \xrightarrow{S} \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(1)} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(1)} \beta_1 c^1 b^{y-1-f(1)} \Lambda \\ & \Lambda b^1 a^{f(1)} \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(1)} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(1)} \xrightarrow{S} \dots \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(k)} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(k)} \beta_1 c^1 b^{y-1-f(k)} \Lambda \\ & \Lambda b^1 a^{f(k)} \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(k)} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(k)} \xrightarrow{S} \dots \\ & \xrightarrow{S} \alpha_n^{x_n + h_n(f^{-1}(y))} \beta_n \dots \alpha_1^{x_1 + h_1(f^{-1}(y))} \beta_1 \Lambda \\ & \Lambda c^1 a^y \gamma_1 \delta_1^{z_1 + g_1(f^{-1}(y))} \dots \gamma_m \delta_m^{z_m + g_m(f^{-1}(y))}. \end{aligned}$$

В случае если $f(k) = k$ и $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = \beta_1 = \dots = \beta_n = \gamma_1 = \dots = \gamma_n = \delta_1 = \dots = \delta_n = \varepsilon$, обозначенные выше соотношения представляются в виде

$$\begin{aligned} \Lambda b^y c^1 \xrightarrow{S} a^1 \Lambda b^{y-1} c^1 \xrightarrow{S} \dots \xrightarrow{S} a^{x+y} \Lambda c^1; \\ c^1 b^{y-1} \Lambda b^1 \xrightarrow{S} c^1 b^{y-2} \Lambda b^1 a^1 \xrightarrow{S} \dots \xrightarrow{S} \Lambda c^1 a^y. \end{aligned}$$

В то же время условие $\Delta^k f = \Delta^k h_1 = \dots = \Delta^k h_n = \Delta^k g_1 = \dots = \Delta^k g_m = 0$ указывает на то, что функции $f, h_1, \dots, h_n, g_1, \dots, g_m$ могут быть интерполированы полиномами, степень которых не превышает $k - 1$.

Пример 3. Вычислим результат выполнения программы, осуществляющей сложение двух чисел, записанных на ленте, при условии, что начальная конфигурация машины равна $\Lambda 1^x 0^y 1^z$:

| | |
|---|---|
| $\Lambda 1^x 0^y 1^z$ | 12: $1^{x-1} 0^{y-1} \Lambda 0^1 1^{z+1}$ |
| 1: $1^1 \Lambda 1^{x-1} 0^y 1^z$ | 11: $1^{x-1} 0^{y-2} \Lambda 0^2 1^{z+1}$ |
| 2: $1^1 \Lambda 1^{x-1} 0^y 1^z$ | 12: $1^{x-1} 0^{y-2} \Lambda 0^2 1^{z+1}$ |
| 1: $1^2 \Lambda 1^{x-2} 0^y 1^z$ | Цикл (11,12): |
| 2: $1^2 \Lambda 1^{x-2} 0^y 1^z$ | 12: $1^{x-2} \Lambda 10^y 1^{z+1}$ |
| Цикл (1,2): | 4: $1^{x-2} \Lambda 0^{y+1} 1^{z+1}$ |
| 2: $1^x \Lambda 0^y 1^z$ | 5: $1^{x-3} \Lambda 1^{10^y+1} 1^{z+1}$ |
| 3: $1^{x-1} \Lambda 1^{10^y} 1^z$ | 6: $1^{x-3} \Lambda 1^{10^y+1} 1^{z+1}$ |
| 4: $1^{x-1} \Lambda 0^{y+1} 1^z$ | Цикл (7,8,...,12,4,5,6): |
| 5: $1^{x-2} \Lambda 10^y 1^{z+1}$ | 6: $\Lambda 0^{y+2} 1^{z+x-1}$ |
| 6: $1^{x-2} \Lambda 10^y 1^{z+1}$ | 13: $\Lambda 0^{y+1} 1^{z+x-1}$ |
| 7: $1^{x-1} \Lambda 0^{y+1} 1^z$ | 14: $\Lambda 0^{y+1} 1^{z+x-1}$ |
| 8: $1^{x-1} \Lambda 0^{y+1} 1^z$ | 13: $\Lambda 0^y 1^{z+x-1}$ |
| 7: $1^{x-1} 0^1 \Lambda 0^y 1^z$ | 14: $\Lambda 0^y 1^{z+x-1}$ |
| 8: $1^{x-1} 0^1 \Lambda 0^y 1^z$ | Цикл (13,14): |
| Цикл (7,8): | 14: $\Lambda 1^{z+x-1}$ |
| 8: $1^{x-1} 0^{y+1} \Lambda 1^z$ | 15: $\Lambda 0^1 1^{z+x-1}$ |
| 9: $1^{x-1} 0^y \Lambda 0^1 1^z$ | 16: $\Lambda 1^{z+x}$ |
| 10: $1^{x-1} 0^y \Lambda 1^{z+1}$ | 17: $\Lambda 1^{z+x}$ |
| 11: $1^{x-1} 0^{y-1} \Lambda 0^1 1^{z+1}$ | |

В результате символьных вычислений получаем строку 1^{z+x} , что является верным ответом.

Концепция внедрения

С целью внедрить метод в автоматизированные системы управления процессом электронного обучения предлагается описанная далее концепция внедрения метода, включающая анализ исходного кода решения задания виртуальной лаборатории, отправленного обучающимся на проверку. Рассмотренные выше примеры программ для машины Поста позволяют сформировать набор символьных представлений возможных базовых блоков программы, которые являются фиксированными для начальной стандартной конфигурации машины Поста. Сформированные наборы можно внести в базу данных системы, формируя хранилище символьных представлений.

Необходимо учитывать, что в символьном виде могут быть представлены не только результаты выполнения программы, но и сам ее код. Данный факт позволяет осуществлять анализ кода программы без необходимости ее полного запуска с целью верификации. Пример сложения двух чисел, представленных на ленте, содержит два идентичных друг другу цикла, отличающихся между собой исключительно номерами команд:

```
...
7 < 8
8 ? 9 7
...
10 < 11
11 ? 12 10
...

```

В символьном виде указанные циклы можно описать как

```
i < i + 1
i + 1 ? i + 2, i,
```

где i — номер команды. Таким образом, при установленной начальной конфигурации машины Поста и правил символьного выполнения операций и циклов появляется возможность вычислить итоговую конфигурацию машины. Циклы (7,8) и (10,11) выполняют операцию перемещения каретки влево до пустой ячейки и осуществляют переход к следующей команде. Идентифицировав эти циклы в ходе анализа кода и проанализировав программу, можно получить полную информацию о системе, описанной обучающимся в ходе выполнения задания. Для рассматриваемого примера цикла (7,8)

$$1^x \Lambda 0^{y-1} 1^z \xrightarrow{(7,8)} \Lambda 0^1 x 0^{y-1} 1^z.$$

Следовательно, правила для цикла были выполнены и машина осуществила переход в новую конфигурацию.

Заключение

После завершения экспериментального исследования были достигнуты следующие результаты.

1. Классифицированы основные виды виртуальных лабораторий, использующихся в образовательном процессе, определены их достоинства и недостатки.
2. Приведено описание разработанного метода управления удаленной лабораторией RLCP, внедренного и успешно используемого в автоматизированной системе управления процес-

сом электронного обучения Университета ИТМО AcademicNT.

3. Разработан метод формальной верификации программ для виртуальной лаборатории «Машина Поста», позволяющий осуществлять оценивание присланных на проверку заданий

виртуальной лаборатории в символьном виде без использования эталонных наборов входных/выходных данных.

4. Предложена концепция реализации и внедрения метода формальной верификации программ в информационно-образовательные системы.

Литература

1. Аврунин О. Г., Крук О. Я., Носова Т. В., Семенец В. В. Технические аспекты разработки виртуальных лабораторных работ по техническим дисциплинам // Открытое образование. 2008. № 3. С. 11–17.
2. Васильев В. Н., Лисицына Л. С., Лямин А. В. Сетевая технология проведения вступительных испытаний по информатике в режиме on-line // Использование информационно-коммуникационных технологий в процессе оценки качества образования: сб. науч. тр. 2008. С. 55–70.
3. Kay J., Reimann P., Diebold E., Kummerfeld B. MOOCs: So Many Learners, So Much Potential... // IEEE Intelligent Systems. 2013. Vol. 28(3). P. 70–77. doi:10.1109/MIS.2013.66
4. Zang X., Iqbal S., Zhu Y., Riaz M. S., Abbas G., Zhao J. Are MOOCs Advancing as Predicted by IEEE CS 2022 Report? // Intern. Conf. on Proc. of the Systems Informatics, Modelling and Simulation (SIMS). 2016. P. 49–55. doi:10.1109/SIMS.2016.14
5. Stuchlikova L., Kosa A. Massive Open Online Courses — Challenges and Solutions in Engineering Education // IEEE 11th Intern. Conf. on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA). 2013. P. 359–364. doi:10.1109/ICETA.2013.6674459
6. Djeghloud H., Larakeb M., Bentounsi A. Virtual Labs of Conventional Electric Machines // Intern. Conf. on Interactive Mobile and Computer Aided Learning (IMCL). 2012. P. 52–57. doi:10.1109/IMCL.2012.6396450
7. Magyar Z., Zakova K. Using SciLab for Building of Virtual Lab // 9th Intern. Conf. on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET). 2010. P. 280–283. doi:10.1109/ITHET.2010.5480084
8. Hristov G., Zahariev P., Bencheva N., Ivanov I. Designing the Next Generation of Virtual Learning Environments — Virtual Laboratory with Remote Access to Real Telecommunication Devices // Proc. of the 24th EAEEIE Annual Conf. (EAEEIE). 2013. P. 139–144. doi:10.1109/EAEEIE.2013.6576517
9. Moritz D., Willems C., Goderbauer M., Moeller P., Meinel C. Enhancing a Virtual Security Lab with a Private Cloud Framework // IEEE Intern. Conf. on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE). 2013. P. 314–320. doi:10.1109/TALE.2013.6654452
10. Ахи А. А., Станкевич А. С., Шалыто А. А. Автоматические методы модификации решений для тестирования проверяющих программ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 81–85.
11. Ефимчик Е. А. Автоматическое построение заданий для проверки навыков выполнения операций над множествами // Новые информационные технологии в образовании: материалы междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 278–281.
12. Lisitsyna L. S., Efimchik E. A., Izgareva S. A. RLCP-compatible Virtual Laboratories with 3d-models and Demonstration Mode: Development and Application in e-learning // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2018. Vol. 75. P. 75–81. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-59451-4_8
13. Efimchik E. A., Cherepovskaya E. N., Lyamin A. V. RLCP-Compatible Virtual Laboratories in Computer Science // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2016. P. 303–314. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-39690-3_27
14. Efimchik E. A., Chezhin M. S., Lyamin A. V., Rusk A. V. Using Automaton Model to Determine the Complexity of Algorithmic Problems for Virtual Laboratories // 9th Intern. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2015). 2015. P. 541–545. doi:10.1109/ICAICT.2015.7338619
15. Sandya M. Competence Possessed by Engineering Professionals in Regard to the Prevailing Trends and Worldwide Attitudes Towards Engineering Education // IEEE Intern. Conf. on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA). 2012. P. 1–6.
16. Post E. L. Finite Combinatory Processes-Formulation 1 // The Journal of Symbolic Logic. 1936. Vol. 1. N 3. P. 103–105.
17. Вашенков О. Е., Лямин А. В. Методика формирования эталонных наборов входных и выходных данных для анализа результатов выполнения заданий с неразрешимым множеством правильных ответов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 3 (61). С. 99–105.
18. Arifi S. M., Zahi A., Benabbou R. Semantic Similarity based Evaluation for C Programs through the Use of Symbolic Execution // IEEE Global Engineering Education Conf. (EDUCON). 2016. P. 826–833. doi:10.1109/EDUCON.2016.7474648

19. Cheatham T. E., Holloway G. H., Townley J. A. Symbolic Evaluation and the Analysis of Programs // IEEE Transactions on Software Engineering. 1979. Vol. SE-5. N 4. P. 402–417. doi:10.1109/TSE.1979.234207

20. Vidal G. Closed Symbolic Execution for Verifying Program Termination // IEEE 12th Intern. Working Conf. on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM). 2012. P. 34–43. doi:10.1109/SCAM.2012.13

UDC 004.023, 004.424

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.104

Method of Formal Program Verification for Post Machine Virtual Laboratory

Lyamin A. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, lyamin@mail.ifmo.ru

^aSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The symbolic method of formal program verification is an effective way to evaluate students' practical skills automatically, especially for tasks with an unsolvable set of correct answers, which significantly simplifies the development of evaluation software. **Purpose:** Developing a new method of formal program verification using symbolic evaluation approach for the programs written for Post Machine virtual laboratory. **Results:** A new method of formal verification of programs written for Post Machine virtual laboratory using symbolic evaluation approach has been developed. The basic principles and examples of programs for Post Machine as well as methods for their symbolic formalization are discussed. Various tasks of running mathematical operations on numbers presented in unary code were considered, i.e. incrementation, addition, multiplication, break point, transfer to a different machine configuration, etc. The considered tasks are sufficient for the students to form basic practical skills in making algorithms. Symbolic representation of students' answers simplifies the development of evaluation tools of the virtual laboratory, making it possible to monitor the formation of students' practical skills automatically. A concept of embedding the presented method of formal program verification into the available online educational platforms is presented. **Practical relevance:** The developed method of formal verification of programs written for Post Machine is used to evaluate students' practical skills in making algorithms. It can simplify the development of virtual laboratories by reducing the costs of forming test sets used to evaluate the students' answers.

Keywords — Information Systems, e-Learning, Virtual Laboratories, Formal Program Verification.

Citation: Lyamin A. V. Method of Formal Program Verification for Post Machine Virtual Laboratory. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 2, pp. 104–114 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.2.104

Reference

- Avrunin O. G., Kruk O. Ia., Nosova T. V., Semenets V. V. Technical Aspects of Development Virtual Laboratory Works for Technical Disciplines. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2008, no. 3, pp. 11–17 (In Russian).
- Vasil'ev V. N., Lisitsyna L. S., Liamin A. V. Network Technology of Passing Entrance Computer Science Tests in Online. *Sbornik nauchnykh trudov "Ispol'zovanie informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologii v protsesse otsenki kachestva obrazovaniia"* [Digest of Scientific Works "Use of Information and Communication Technologies in the Process of Assessing the Quality of Education"], 2008, pp. 55–70 (In Russian).
- Kay J., Reimann P., Diebold E., Kummerfeld B. MOOCs: So Many Learners, So Much Potential... *IEEE Intelligent Systems*, 2013, vol. 28(3), pp. 70–77. doi:10.1109/MIS.2013.66
- Zang X., Iqbal S., Zhu Y., Riaz M. S., Abbas G., Zhao J. Are MOOCs Advancing as Predicted by IEEE CS 2022 Report? *Intern. Conf. on Proc. of the Systems Informatics, Modelling and Simulation (SIMS)*, 2016, pp. 49–55. doi:10.1109/SIMS.2016.14
- Stuchlikova L., Kosa A. Massive Open Online Courses — Challenges and Solutions in Engineering Education. *IEEE 11th Intern. Conf. on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, 2013, pp. 359–364. doi:10.1109/ICETA.2013.6674459
- Djehghloud H., Larakeb M., Bentounsi A. Virtual Labs of Conventional Electric Machines. *Intern. Conf. on Interactive Mobile and Computer Aided Learning (IMCL)*, 2012, pp. 52–57. doi:10.1109/IMCL.2012.6396450
- Magyar Z., Zakova K. Using SciLab for Building of Virtual Lab. *9th Intern. Conf. on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, 2010, pp. 280–283. doi:10.1109/ITHET.2010.5480084
- Hristov G., Zahariev P., Bencheva N., Ivanov I. Designing the Next Generation of Virtual Learning Environments — Virtual Laboratory with Remote Access to Real Telecommunication Devices. *Proc. of the 24th EAEEIE Annual Conf. (EAEEIE)*, 2013, pp. 139–144. doi:10.1109/EAEEIE.2013.6576517
- Moritz D., Willems C., Goderbauer M., Moeller P., Meinel C. Enhancing a Virtual Security Lab with a Private Cloud Framework. *IEEE Intern. Conf. on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 2013, pp. 314–320. doi:10.1109/TALE.2013.6654452
- Ahi A. A., Stankevich A. S., Shalyto A. A. Automatic Solution Modifications for Testing Solution Checkers. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mehaniki i optiki*, 2012, no. 1(77), pp. 81–85 (In Russian).
- Efimchik E. A. Automatic Creation of Tasks for Assessing Skills of Performing Operations on Sets. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Novye informacionnye tekhnologii v obrazovanii"* [Proc. of the Intern. Scientific and Practical Conf. on the New Educational Information Technologies], 2013, pp. 278–281 (In Russian).
- Lisitsyna L. S., Efimchik E. A., Izgareva S. A. RLCP-compatible Virtual Laboratories with 3d-models and Demonstration Mode: Development and Application in e-learning. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2018, vol. 75, pp. 75–81. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-59451-4_8
- Efimchik E. A., Cherepovskaya E. N., Lyamin A. V. RLCP-Compatible Virtual Laboratories in Computer Science. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2016, pp. 303–314. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-39690-3_27
- Efimchik E. A., Chezhin M. S., Lyamin A. V., Rusak A. V. Using Automaton Model to Determine the Complexity of Algorithmic Problems for Virtual Laboratories. *9th Intern. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2015)*, 2015, pp. 541–545. doi:10.1109/ICAICT.2015.7338619
- Sandya M. Competence Possessed by Engineering Professionals in Regard to the Prevailing Trends and Worldwide Attitudes Towards Engineering Education. *IEEE Intern.*

- Conf. on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA)*, 2012, pp. 1–6.
16. Post E. L. Finite Combinatory Processes-Formulation 1. *The Journal of Symbolic Logic*, 1936, vol. 1, no. 3, pp. 103–105.
 17. Vashenkov O. E., Liamin A. V. Creation Technique of Reference Entrance and Target Data Sets for the Evaluation of Tasks with Unsolvability Set of Right Answers. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2009, no. 3 (61), pp. 99–105 (In Russian).
 18. Arifi S. M., Zahi A., Benabbou R. Semantic Similarity based Evaluation for C Programs through the Use of Symbolic Execution. *IEEE Global Engineering Education Conf. (EDUCON)*, 2016, pp. 826–833. doi:10.1109/EDUCON.2016.7474648
 19. Cheatham T. E., Holloway G. H., Townley J. A. Symbolic Evaluation and the Analysis of Programs. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1979, vol. SE-5, no. 4, pp. 402–417. doi:10.1109/TSE.1979.234207
 20. Vidal G. Closed Symbolic Execution for Verifying Program Termination. *IEEE 12th Intern. Working Conf. on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM)*, 2012, pp. 34–43. doi:10.1109/SCAM.2012.13

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»**

выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 15385 — полугодовой индекс, а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy).

**АНДРЕЕВ
Андрей
Михайлович**



Ведущий научный сотрудник Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1983 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы». В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций.

Область научных интересов — сбор и обработка информации, радиоэлектронный контроль объектов в воздушно-космическом пространстве.

Эл. адрес:
aandreev961@yandex.ru

**БУРЛУЦКИЙ
Сергей
Геннадьевич**



Заместитель заведующего кафедрой управления и эксплуатации аэрокосмических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Вильнюсское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО по специальности «Командная, тактическая, автоматизированные системы управления», в 1994 году — Гуманитарную академию Вооруженных Сил.

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 27 научных публикаций и восьми патентов на изобретения.

Область научных интересов — управление аэрокосмическими системами.

Эл. адрес:
sergey_burluckiy@mail.ru

**ГОРДЕЕВ
Александр
Владимирович**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1975 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 90 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование параллельных вычислительных систем, распределенные вычисления, вычислительные сети.

Эл. адрес: avg@aanet.ru

**ГОРЕЛИК
Денис
Вадимович**



Магистрант кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2016 году окончил с отличием бакалавриат Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором двух научных публикаций.

Область научных интересов — развертывание виртуальных компьютерных сетей и приложений с использованием виртуальных машин и контейнеров, создание соответствующих вычислительных кластеров.

Эл. адрес: den5509@mail.ru

**ГРИГОРЬЕВ
Александр
Павлович**



Ассистент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, начальник проектно-конструкторского сектора АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург.

В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Измерительные информационные технологии».

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматизированные, адаптивные и интеллектуальные тренажерно-обучающие системы, теория нечетких (размытых) множеств и др.

Эл. адрес: alexgrig-1986@mail.ru

**ДЗЮБЕНКО
Иван
Николаевич**



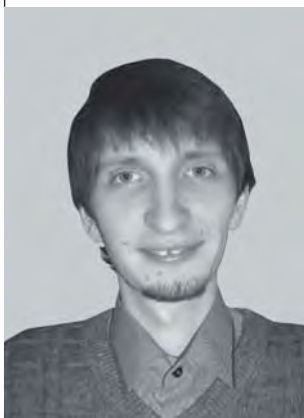
Магистрант кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2017 году окончил бакалавриат Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Информационная безопасность».

Область научных интересов — разработка систем Интернета вещей, моделирование систем инфокоммуникаций.

Эл. адрес: mail@mail.ru

**ЕГОРОВ
Игорь
Валерьевич**



Аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

В 2012 году окончил с отличием факультет технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором четырех научных публикаций.

Область научных интересов — надежность вычислительных систем, программная инженерия, проектирование вычислительных систем.

Эл. адрес: iegorov@kspt.icc.spbstu.ru

**ЕГОРОВА
Инга
Сергеевна**



Аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В 2015 году окончила Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Технологии проектирования системного и прикладного программного обеспечения».

Область научных интересов — автоматизация процессов разработки качественного программного обеспечения.

Эл. адрес: is.egorova@mail.ru

**ЕФИМОВ
Александр
Андреевич**



Профессор кафедры управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1972 году окончил с отличием Томский политехнический институт по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 220 научных и учебно-методических публикаций, в том числе трех монографий и трех патентов на изобретения.

Область научных интересов — электромеханические системы и силовая электроника.

Эл. адрес: efa33@aanet.ru

**ИЦЫКСОН
Владимир
Михайлович**



Доцент, заведующий кафедрой компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. В 1996 году окончил Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

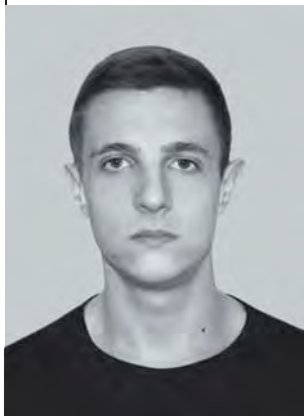
В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — программная инженерия, методы разработки качественного программного обеспечения, статический анализ и верификация программ.

Эл. адрес: vlad@icc.spbstu.ru

**КИРИЛЕНКО
Николай
Евгеньевич**



Младший научный сотрудник Научно-исследовательского технологического центра нейротехнологий Южного федерального университета, Ростов-на-Дону.

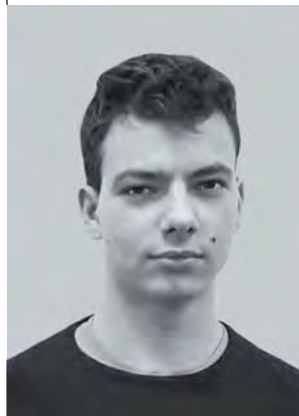
В 2017 году окончил магистратуру Южного федерального университета по специальности «Компьютерные технологии в приборостроении».

Является автором девяти научных публикаций.

Область научных интересов — задачи анализа, классификации и идентификации сигналов, динамические осцилляторные системы, биомедицинские приложения, вейвлет-анализ.

Эл. адрес: nikolai-kirilenko@mail.ru

**КНЯЖСКИЙ
Александр
Юрьевич**



Аспирант, ассистент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2016 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение».

Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, обработка информации.

Эл. адрес: knjagskij@mail.ru

**КРЮКОВ
Дмитрий
Алексеевич**



Доцент кафедры корпоративных информационных систем Московского технологического университета.

В 2009 году окончил Институт криптографии, связи и информатики по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Область научных интересов — GSM-сети, SMART-карты, программирование на языках высокого уровня, криптография.

Эл. адрес: dm.bk@bk.ru

**КУЧМИН
Андрей
Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории механики управляемых систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и управление в технических системах».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов — математическое моделирование в естественных науках, искусственный интеллект и принятие решений, математические проблемы теории управления и др.

Эл. адрес: radiotelescope@yandex.ru

**ЛЯМИН
Андрей
Владимирович**



Доцент кафедры компьютерных образовательных технологий Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 1994 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Управление и информатика в технических системах».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 170 научных публикаций.

Область научных интересов — информационные системы и технологии, моделирование информационных процессов и систем, аффективные вычисления и когнитивные процессы, машинное обучение и распознавание образов и т. д.

Эл. адрес: lyamin@mail.ifmo.ru

**МЕЛЕХИН
Виктор
Федорович**



Профессор кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, заслуженный работник высшей школы РФ.

В 1960 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 230 научных публикаций, 52 изобретений, 23 патентов, четырех монографий, шести учебников и 14 учебных пособий.

Область научных интересов — теория и технология проектирования вычислительных систем и устройств.

Эл. адрес: melekhin@kspt.icc.spbstu.ru

**ПЕРВУШИН
Алексей
Олегович**



Магистрант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 2012 году окончил Университет ИТМО по специальности «Информационная безопасность».

Является автором двух научных публикаций.

Область научных интересов — защита персональных данных, киберфизические системы, машинное обучение, сетевые технологии.

Эл. адрес: aeksei94@gmail.com

**СКОРОХОДОВ
Ярослав
Анатольевич**



Начальник лаборатории Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2008 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированные системы обработки и анализа измерительной информации космических средств».

В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — системы искусственного интеллекта, теория статистических решений, статистического моделирования, методы обработки и анализа измерительной информации, теория выбросов траекторий случайных процессов.

Эл. адрес: yaroslavskor@gmail.com

ТАТАРНИКОВА

Татьяна Михайловна



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей. Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

ТЕСКЕР

Иван Александрович



Магистрант Московского технологического университета. Область научных интересов — машинное обучение, криптография, сети, Интернет вещей, дополненная и виртуальная реальность. Эл. адрес: teskerivan.t@gmail.com

УТКИНА

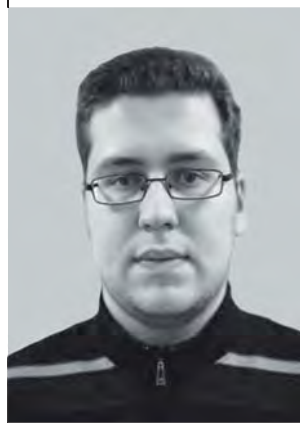
Алена Алексеевна



Магистрант кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов — формализованная логика, криптографические протоколы, теория конечных автоматов. Эл. адрес: alena_utkina_95@mail.ru

ЧЕРНЕЛЕВСКИЙ

Анатолий Олегович



Магистр кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, инженер отдела топливных систем Инженерно-инновационного центра ПАО «Техприбор», Санкт-Петербург. В 2017 году окончил с отличием магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Приборостроение». Является автором более 25 научных публикаций. Область научных интересов — психопрограммирование, психология, искусственный интеллект. Эл. адрес: anatoliy.chernelevskiy@mail.ru

ЩЕРБАНЬ

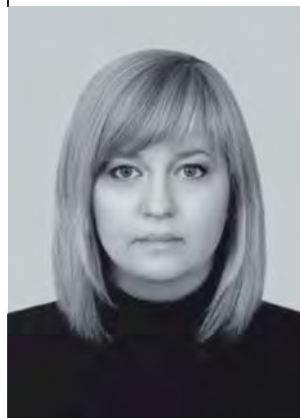
Игорь Васильевич



Профессор кафедры информационных и измерительных технологий Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Ростов-на-Дону. В 1989 году окончил Ростовское высшее военное инженерное училище Ракетных войск по специальности «Системы управления летательных аппаратов». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и изобретений. Область научных интересов — оптимальная идентификация, оценивание, стохастические динамические системы (объекты). Эл. адрес: shcheri@mail.ru

ЩЕРБАНЬ

Оксана Георгиевна



Доцент кафедры информационных и измерительных технологий Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Ростов-на-Дону. В 1993 году окончила Южный федеральный университет по специальности «Математика, информатика и вычислительная техника». В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций и изобретений. Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, непараметрическая идентификация, стохастические динамические системы (объекты). Эл. адрес: shchero@mail.ru

**ЮРКИН
Дмитрий
Валерьевич**



Доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Защищенные системы связи». Является автором более 30 учебных и научных публикаций. Область научных интересов — системы радиосвязи и защиты информации, криптографические протоколы, методы согласования работы дискретных автоматов. Эл. адрес: DVYurkin@yandex.ru

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисуночные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (*.vsd, *.vsdx); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.docx); Adobe Illustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисуночных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://ius.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru