

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 24  
2018  
№ 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Гуарий М. М., Жаров М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л. Редуцирование модели электрической схемы с учетом характеристик внешних цепей . . . 563
- Денисова И. П., Костиков Ю. А., Лебедева М. В., Пасисниченко М. А. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение системы лазерной локации космических аппаратов с использованием подвижного телескопа . . . . . 573

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Филинских А. Д., Корсаков К. С. Интерактивная трехмерная модель Нижегородского Кремля . . . . . 582

### БАЗЫ ДАННЫХ

- Чернышов А. В. Исследование свойств долговременных электронных архивных хранилищ информации на оптических дисках, организованных в структуры RAID-5 . . . . . 586

### БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Стюгин М. А., Золотарев В. В., Паротькин Н. Ю. Подход к защите информационных систем от уязвимостей, не выявленных на стадии проектирования системы . . . . . 594

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Боровский А. С., Шумилина Н. А. Метод интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в проектах промышленных предприятий . . . . . 601

### КОДИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

- Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шурыгин А. В. Оценка возможностей использования bluetooth-устройств для навигации внутри помещений . . . 610

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Доронина Ю. В. Метод структурно-функционального синтеза информационной системы с учетом нечеткой привязки функций . . . . . 618

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.

ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,

акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.

КУЛЕШОВ А. П.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ПОПКОВ Ю. С.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

РУСАКОВ С. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

РЯБОВ Г. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

СОЙФЕР В. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СОКОЛОВ И. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.

ЧАПЛЫГИН Ю. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ШАХНОВ В. А.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

ШОКИН Ю. И.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ЮСУПОВ Р. М.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.

АНТОНОВ Б. И.

БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.

ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.

ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.

ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.

ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.

ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.

ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.

ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.

КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.

КОЛИН К. К., д. т. н., проф.

КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.

КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.

ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.

МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.

МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.

НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.

ПОЛЕШУК О. М., д. т. н., проф.

САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.

СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.

ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.

УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)

ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.

ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

ЛЫСЕНКО А. В.

ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.  
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

# INFORMATION TECHNOLOGIES

# INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 24  
2018  
No. 9

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

## CONTENTS

### MODELING AND OPTIMIZATION

- Gourary M. M., Rusakov S. G., Zharov M. M., Ulyanov S. L.** Model Order Reduction of Electrical Circuits Taking Account of External Networks Characteristics . . . . . 563
- Denisova I. P., Kostikov Yu. A., Lebedeva M. V., Pasisnichenko M. A.** Mathematical, Algorithmic and Software Support for a Spacecraft Laser-Ranging System Using a Movable Telescope . . . . . 573

### COMPUTER GRAPHICS AND GEOMETRIC MODELING

- Filinskih A. D., Korsakov K. S.** Interactive Three-Dimensional Model of the Nizhny Novgorod Kremlin . . . . . 582

### DATABASE

- Chernyshov A. V.** The Study of the Properties of Long-Term Electronic Archival Information Storage on Optical Disks Organized into a Structure of RAID-5 . . 586

### INFORMATION SECURITY

- Styugin M. A., Zolotarev V. V., Parotkin N. Y.** Protection of Information Systems from Undetected Vulnerabilities . . . . . 594

### INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Borowski A. S., Shumilina N. A.** Predictive Support for Decision-Making in Projects of Industrial Enterprises . . . . . 601

### CODING AND SIGNAL PROCESSING

- Grinyak V. M., Devyatitsilny A. S., Shurygin A. V.** Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons . . . . . 610

### APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Doronina Yu. V.** Method of Structural-Functional Synthesis Information System Taking into Account the Fuzzy Binding Functions . . . . . 618

#### Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kuleshov A. P., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Popkov Yu. S., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Soifer V. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov I. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Suetin N. V.,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shokin Yu. I., Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,  
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Antonov B. I.  
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.  
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)  
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Martyanov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.  
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)  
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)  
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

#### Editors:

Bezmenova M. Yu.  
Lysenko A. V.  
Chugunova A. V.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.942 519.876.5

DOI: 10.17587/it.24.563-572

**М. М. Гурарий**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: gourary@yandex.ru,

**М. М. Жаров**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: zarov@ippm.ru,

**С. Г. Русаков**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: rusakov@ippm.ru,

**С. Л. Ульянов**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: ulyas@ippm.ru,

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, 124365

## Редуцирование модели электрической схемы с учетом характеристик внешних цепей

*Показано, что важным направлением совершенствования проекционных методов редуцирования моделей линейных электрических цепей является учет характеристик их схемного окружения. Для решения этой задачи разработан подход к построению редуцированной модели подсхемы линейной цепи на основе метода отбора векторов состояния. Обсуждаются возможности учета нелинейного окружения схемы. Численные эксперименты показали существенное повышение точности и снижение порядка редуцированной модели при использовании предложенного метода.*

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, понижение порядка моделей, схемотехническое моделирование, линейная подсхема, проекционные методы редукации, подпространство Крылова

### Введение

В последние десятилетия интенсивно развиваются методы редукции моделей (*model order reduction* — MOR) линейных цепей [1, 2]. Среди известных подходов выделяются проекционные алгоритмы, которые обеспечивают более экономичные модели по сравнению с селективными методами [3] и требуют, как правило, существенно меньших затрат по сравнению с методами балансной реализации [4]. Впервые проекционные алгоритмы были реализованы в методе AWE [5], основанном на Паде-аппроксимации передаточной функции (ПФ) схемы. Существенным недостатком метода был рост вычислительного шума при использовании моментов высокого порядка. Избавиться от этого позволило применение алгоритмов на основе подпространств Крылова в методах PVL [6] и Арнольди [7]. Дальнейшее совершенствование проекционных алгоритмов в методе PRIMA [8] дало возможность сохранения пассивности благодаря явному проектированию исходной матрицы на базис подпространства Крылова. Проекционные методы для многопортовых схем разрабатывали как распространение однопортовых алгоритмов на блочную форму

подпространства Крылова [9]. Эти алгоритмы включают ортогонализацию моментов векторов состояния, соответствующих единичному возбуждению каждого входного порта. При этом выполняется отбрасывание (*deflation*) векторов по критерию линейной зависимости.

Основной недостаток многопортовых проекционных методов типа PRIMA — это избыточность размера проекционной матрицы [10]. В результате порядок редуцированной модели часто оказывается намного больше порядка, требуемого для обеспечения желательной точности. Для получения более компактных моделей были предложены многоточечные версии известных подходов [11, 12], но в большинстве случаев это не приводило к заметному снижению избыточности, что связано с фиксированной последовательностью генерации векторов состояния, содержащей сильно коррелированные вектора.

Этого можно избежать, определив базис на основе анализа моментов решений для избыточного множества частотных точек в требуемом диапазоне. Такой анализ может быть выполнен с помощью сингулярного разложения (SVD) множества векторов и последующего формирования базиса из векторов с наибольшими сингулярными значениями. В PMTBR [13]

SVD применяется к взвешенным значениям векторов состояния, полученным при единичном возбуждении каждого входного порта во всех частотных точках, заданных пользователем. Теоретической основой PMTBR является метод ограниченной балансной реализации (TBR) [4] и приближенная оценка грамиана управляемости с помощью SVD. Грамиан наблюдаемости при этом не учитывается, что для несимметричных систем может приводить [14] к избыточности построенного базиса и к неверной оценке погрешности.

Другой подход к снижению избыточности состоит в адаптивном выборе частотной точки с максимальной ошибкой текущей редуцированной модели. Такой выбор снижает корреляцию отбираемых векторов, что уменьшает избыточность. Для оценки ошибки используют разложение в ряд Тейлора [15, 16] либо значение невязки с учетом спектра матрицы [17, 18]. Прямая и надежная оценка применяется в методе отбора векторов состояния (SVS) в работе [14], где (аналогично PMTBR) генерируется избыточное множество векторов состояния в заданных частотных точках. Оценка ошибки и адаптивный выбор очередной точки осуществляются только из этого множества.

Однако снижение коррелированности исходных векторов не решает полностью проблему избыточности. Каждая линейная подсистема интегральной схемы находится в окружении известных линейных и нелинейных компонентов, которые ограничивают мощности сигналов на ее выводах. Существующие процедуры редуцирования предполагают произвольный характер сигналов на выводах подсистемы, что может приводить к обеспечению требуемой точности для режимов, которые никогда не реализуются в рамках конкретного окружения этой подсистемы. Поэтому целесообразно, чтобы при редуцировании приближенно учитывалась среда схемы, например максимальные уровни сигналов и токов нагрузки, пределы значений емкостей нагрузок, импедансы источников и т. п. В существующих методах такой учет отсутствует.

В работе обсуждается ресурс понижения избыточности благодаря учету среды функционирования редуцируемой схемы и предлагается алгоритм, позволяющий при построении редуцированной модели линейной электрической схемы добиться существенного снижения ее избыточности за счет учета характеристик схемного окружения.

## 1. Принципы редуцирования на основе проективных методов

### Описание линейной динамической системы.

Линейная система с  $N_{\text{inp}}$  входами,  $N_{\text{out}}$  выходами и  $N$  внутренними состояниями в матричном виде имеет следующую форму:

$$(G + sC)X = B; Z = D^T X, \quad (1)$$

где  $s$  — лапласовская переменная (обобщенная частота), а матрицы в (1) с указанными ниже размерностями задают:

- $G, C (N \times N)$  — внутренние проводимости и емкости;
- $B (N \times N_{\text{inp}})$  — возмущения внутренних состояний от входных сигналов;
- $D (N \times N_{\text{out}})$  — передачи внутренних состояний на выходы;
- $Z (N_{\text{out}} \times N)$  — ПФ от входных к выходным портам;
- $X (N \times N_{\text{inp}})$  — ПФ от входных портов к внутренним состояниям.

Обозначив  $Y(s) = G + sC$ , можно записать решение (1) в виде:

$$X(s) = Y(s)^{-1} B; Z(s) = D^T Y(s)^{-1} B. \quad (2)$$

Моменты решения системы (1) в частотной (лапласовской) точке  $s$  —  $X^{[k]}(s)$  получаются последовательным дифференцированием (2) и имеют вид:

$$\begin{aligned} X^{[0]}(s) &= X(s) = Y(s)^{-1} B, \\ X^{[k]}(s) &= \frac{1}{k!} \frac{d^k}{ds^k} X(s) = -Y(s)^{-1} C X^{[k-1]}(s). \end{aligned} \quad (3)$$

Для систем с одним входом ( $N_{\text{inp}} = 1$ ,  $B$  и  $X^{[k]}(s)$  — вектор-столбцы) из (3) видно, что моменты определяют пространство Крылова с матрицей  $-Y(s)^{-1} C$ . При  $N_{\text{inp}} > 1$  выражения (3) задают блочное пространство Крылова.

**Проекционные методы.** Проекционные методы редуцирования состоят в преобразовании системы (1) в систему порядка  $N_{\text{red}} < N$  путем умножения (1) на правую ( $V$ ) и левую ( $W$ ) матрицы проектирования с размерностями  $N \times N_{\text{red}}$ :

$$(\widehat{G} + s\widehat{C})\widehat{X} = \widehat{B}; \widehat{Z} = \widehat{D}^T \widehat{X}, \quad (4)$$

где

$$\widehat{G} = W^T G V, \widehat{C} = W^T C V, \widehat{B} = W^T B, \widehat{D} = V^T D. \quad (5)$$

Вид проективной формы редуцированной системы (4), (5) получается путем использования метода Галеркина и может быть объяснен следующим образом.

Обозначим  $i$ -е столбцы матриц  $B$ ,  $D$ ,  $X$ ,  $Z$ ,  $V$  как  $b^{(i)}$ ,  $d^{(i)}$ ,  $x^{(i)}$ ,  $z^{(i)}$ ,  $v^{(i)}$ . Тогда решение системы (1) в точке  $s$  для единичного значения  $i$ -го входа можно аппроксимировать линейной комбинацией столбцов матрицы  $V$  ( $v^{(k)}$ ) с коэффициентами, являющимися переменными редуцированной системы (4):

$$x^{(i)}(s) \approx \tilde{x}^{(i)}(s) = V \hat{x}^{(i)}(s) = \sum_{k=1}^{N_{red}} \hat{x}_k^{(i)}(s) v^{(k)},$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{inp}. \quad (6)$$

Здесь  $\tilde{x}^{(i)}(s)$  — аппроксимация  $x^{(i)}(s)$ ;  $\hat{x}_k^{(i)}(s)$  —  $k$ -й компонент вектора  $\hat{x}^{(i)}(s)$ .

Вектор невязки системы (1) после подстановки (6) (далее — вектор аппроксимационной невязки), имеющий вид

$$\tilde{r}^{(i)}(s) \approx Y(s) \tilde{x}^{(i)}(s) - b^{(i)}(s) =$$

$$= (GV + sCV) \tilde{x}^{(i)}(s) - b^{(i)}(s),$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{inp}, \quad (7)$$

должен быть ортогональным ко всем столбцам матрицы  $W$ :

$$W^T \tilde{r}^{(i)}(s) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{inp}. \quad (8)$$

Приближенные значения выходных переменных находятся подстановкой аппроксимации  $\tilde{X}(s)$  вместо  $X(s)$  в выражение для выходных значений в (1):

$$\hat{z}^{(i)}(s) = D^T \tilde{x}^{(i)}(s) = D^T V \hat{x}^{(i)}(s),$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{inp}. \quad (9)$$

После подстановки (7) в (8) и (6) в (9) получим уравнения для столбцов, соответствующие (4), (5). Решением редуцированной системы (4) в точке  $s$  являются коэффициенты линейной формы представления аппроксимации решения (6), которые обеспечивают ортогональность вектора невязки ко всем столбцам матрицы  $W$  в данной точке  $s$ . Отсюда следует теорема: вектор состояния исходной системы в некоторой точке  $s$  является линейной комбинацией столбцов матрицы  $V$  тогда и только тогда, когда этот вектор состояния совпадает со своей аппроксимацией в данной точке.

Эта теорема распространяется на моменты высших порядков. Она является основой мето-

дов согласования моментов, в рамках которых [19] матрица проектирования  $V$  формируется путем построения ортонормированного базиса заданного набора моментов. Преобразование (5) называется конгруэнтным\*, если обе матрицы проектирования равны между собой ( $W = V$ ). Такое преобразование гарантирует сохранение симметричности матриц  $C$ ,  $G$  и системы в целом, а также пассивности системы в целом [8]. Поэтому далее мы будем рассматривать только конгруэнтные преобразования.

Как было указано ранее, избыточность крыловских методов вызвала разработку подходов на базе сингулярного разложения (SVD) и адаптивного выбора точек разложения. Адаптивный метод SVS обеспечивает возможность управлять оценкой погрешности. Этот метод мы будем использовать далее. Ниже приводится его описание.

**Алгоритм редукции методом отбора векторов состояния (SVS).** На начальном шаге SVS решается система (1) применением (2) в достаточно плотном множестве частотных точек  $\{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ , и в памяти сохраняются все матрицы  $X(s_m)$ ,  $Z(s_m)$ . Далее выполняется итерационный процесс, в котором после определения  $n$  базисных векторов (столбцы матрицы проектирования  $V^{(n)} = \{v^{(1)}, \dots, v^{(n)}\}$ ) и матриц (5) редуцированной системы (4) для определения  $(n + 1)$ -го базисного вектора нужно выполнить следующие шаги.

1. Решить текущую редуцированную систему (4) во всех частотных точках  $\hat{Z}^{(n)}(s_m) = D^{(n)}(Y^{(n)}(s_m))^{-1}B^{(n)}$  и найти частоту  $s = s_M$  и входной вектор  $u^*$ , реализующие максимальную ошибку, выполнив два шага:

а) для каждой частоты найти максимальную ошибку по заданной норме

$$e^{\max}(s_m) = \max_{u \in U} \|(Z(s_m) - \hat{Z}^{(n)}(s_m))u\|,$$

$$m = 1, 2, \dots \quad (10)$$

и "наихудший" входной вектор  $u^*(s_m)$ , при котором она достигается; здесь  $U$  — это область допустимых входных амплитуд;

б) найти частоту  $s_M$  максимальной ошибки  $M = \arg \max_m e^{\max}(s_m)$ .

\* В линейной алгебре понятие конгруэнтности [20] определено только для квадратной матрицы  $V$ , но в работах по редукции линейных систем используется его расширение на случай произвольной прямоугольной матрицы.

2. Если  $e^{\max}(s_M) < E$ , то завершить процесс редуцирования.

3. Определить новый базисный вектор ортогонализацией "наихудшего" вектора состояния  $x^* = X(s_M)u^*$  к предыдущим базисным векторам

$$v^{(n+1)} = x^* \perp V^{(n)}, V^{(n+1)} = [V^{(n)}, v^{(n)}]. \quad (11)$$

4. Определить матрицы (5) редуцированной системы порядка  $n + 1$ .

5. Перейти к п. 1 для выполнения следующей итерации.

Важным достоинством алгоритма SVS является то, что норма ошибки не задана заранее в виде какого-либо математического определения, а может быть гибко изменена в зависимости от требований пользователя. В [14] рассмотрены примеры задания нормы в виде наибольшей погрешности среди ПФ между всеми входами и выходами схемы, а также как максимальную погрешность среди выходов схемы при наихудшем сочетании амплитуд входных сигналов.

**Применение проекционных методов для редуцирования модели линейной электрической схемы.** Представленные выше методы решают задачу редуцирования линейной динамической системы (1). Для их применения к редуцированию линейной электрической схемы необходимо представить ее уравнения в виде (1). Если схема описывается модифицированным методом узловых потенциалов — MNA [21], то переменные состояния  $x$  — это узловые напряжения (включая напряжения на внешних выводах) и токи индуктивностей, а  $C$  и  $G$  — это соответствующие MNA матрицы. При этом следует учесть, что полные лапласовские проводимости элементов матриц ( $Y_{ij} = G_{ij} + sC_{ij}$ ) связаны с параметрами линейных компонент схемы ( $y_{ij} = g_{ij} + sc_{ij}$ ) соотношениями

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (i \neq j), \quad Y_{ii} = \sum_{k=0}^N y_{ik}, \quad (12)$$

где  $y_{i0}$  — проводимость между  $i$ -м узлом схемы и "землей".

Для генерации решений  $X(s_m), Z(s_m)$  при редуцировании схемы к ее внешним выводам подключают единичные источники тока и/или напряжения [8], задающие входные сигналы системы (1). Если  $i$ -й входной сигнал задается источником тока в  $k$ -м узле схемы, то в матрице  $B$  формируется  $B_{ki} = 1$ . В случае источника напряжения ток источника становится дополнительной ( $m$ -й) переменной состояния, ма-

трица  $G$  расширяется на  $m$ -е столбец и строку с  $G_{km} = G_{mk} = 1$ , а в матрице  $B$  устанавливается  $B_{mi} = 1$ . Выходные переменные определяются двойственным образом: как напряжения на источниках тока и токи источников напряжения. При этом  $D = B$ .

Пример схемы из трех узлов с двумя выводами представлен на рис. 1, а (см. вторую сторону обложки).

Вектора и матрицы динамической системы для этой схемы имеют вид

$$X = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ I_2 \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \\ Z = \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \quad (13) \\ Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 0 \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & 1 \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где элементы  $Y_{ij}$  определяются из  $y_{ij}$  на рис. 1, а, по формулам (12).

Результат редуцирования также имеет форму динамической системы (4), которую нужно преобразовать в электрическую подсхему для ее подключения к узлам внешней цепи. Пусть редуцированная система вида (4) имеет  $2 \times 2$  матрицы  $\hat{Y}, \hat{B}, \hat{D}$ , а переменные вход/выход соответствуют источникам на рис. 1, а, (см. вторую сторону обложки). Соответствующая этой системе схема (рис. 1, б, см. вторую сторону обложки) содержит два внутренних узла (1, 2) и два вывода:  $U1$  — напряжение/ток,  $U2$  — ток/напряжение. Внутренние узлы соединены проводимостями  $\hat{y}$ , полученными из (12), и к ним подключены источники тока, управляемые входными переменными каждого из выводов с коэффициентами передачи из матрицы  $\hat{B}$ . Выходные переменные выводов формируются источниками необходимого типа, управляемыми напряжениями внутренних узлов с коэффициентами передачи из матрицы  $\hat{D}$ .

## 2. Редуцирование модели подсхемы линейной электрической схемы

Редуцирование схемы при ее возбуждении идеальными источниками сигнала может недостаточно соответствовать реальным режимам работы схемы. Сигналы на выводах ре-

дуцируемой схемы формируются за счет взаимодействия ее компонентов и компонентов ее схемного окружения, включая источники сигналов. Для учета этого взаимодействия предлагается рассмотреть задачу редуцирования электрической цепи в рамках линейного схемного окружения, приближенно отражающего условия функционирования этой схемы в ИС. Простейшими примерами такого линейного окружения могут быть выходные сопротивления источников сигналов и емкости нагрузки. Предполагается, что взаимодействие окружения со схемой осуществляется только через выводы (граничные узлы) схемы, которые полностью или частично совпадают с узлами окружения. Указанную задачу редуцирования подсхемы линейной электрической схемы можно сформулировать следующим образом.

Пусть задана линейная электрическая схема, характеризуемая вектором состояний (узловых потенциалов и токов индуктивных ветвей) с размерностью  $N$ . Частью этой схемы является редуцируемая подсхема с вектором внутренних состояний  $x_I$  размерностью  $N_I$ . Остальная часть схемы (окружение) описывается вектором состояний  $x_S$  размерностью  $N_S$ . Предполагается, что компоненты каждого из частных векторов непрерывно следуют друг за другом в пределах общего вектора  $x$ , т. е.:  $x = [x_I x_S]^T$ ,  $N = N_I + N_S$ . Индексы  $I$  и  $S$  обозначают множества внутренних узлов подсхемы и узлов окружения соответственно.

Состояние схемы определяется из системы лапласовских уравнений

$$\left( \begin{bmatrix} G_{II} & G_{IS} \\ G_{SI} & G_{SS} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} C_{II} & C_{IS} \\ C_{SI} & C_{SS} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} X_I \\ X_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_S \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Индексы матриц в (14) определяют множества узлов, между которыми заданы соответствующие элементы матрицы проводимостей и емкостей, а матрица  $B_S$  размерностью  $N_S \times N_{imp}$  определяет амплитуды сигналов источников напряжения и тока общим числом  $N_{imp}$ , включенных в схемное окружение.

Предполагается, что воздействие на подсхему осуществляется только через узлы схемного окружения, а непосредственное воздействие на внутренние узлы отсутствует. Выходные показатели обычно определяются состоянием схемного окружения ( $X_S$ ), которое является результатом решения (14).

Определим задачу редуцирования подсхемы внутри заданного окружения как получение матриц  $(\hat{G}_{II}, \hat{C}_{II}, \hat{G}_{IS}, \hat{C}_{IS}, \hat{G}_{SI}, \hat{C}_{SI})$  редуцированной подсхемы, обеспечивающих близость (в заданном смысле) состояния полной исходной схемы (14) к состоянию схемы с редуцированной моделью подсхемы:

$$\left( \begin{bmatrix} \hat{G}_{II} & \hat{G}_{IS} \\ \hat{G}_{SI} & G_{SS} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} \hat{C}_{II} & \hat{C}_{IS} \\ \hat{C}_{SI} & C_{SS} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{X}_I \\ \hat{X}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_S \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Здесь матрицы окружения  $G_{SS}$ ,  $C_{SS}$  не редуцируются.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом Галеркина, но в отличие от редуцирования линейной системы (1) мы используем  $N_S \times N_I$  матрицу проектирования для аппроксимации только внутреннего состояния подсхемы в виде:  $x_I(s) \approx \tilde{x}_I(s) = V \hat{x}_I(s)$ , а окружение подсхемы не должно меняться при редуцировании:  $x_S(s) \approx \tilde{x}_S(s) = \hat{x}_S(s)$ . Тогда аппроксимация состояния системы (14) на основе решения (15) запишется в виде:

$$\begin{bmatrix} x_I(s) \\ x_S(s) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \tilde{x}_I(s) \\ \tilde{x}_S(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \hat{x}_I(s) \\ \hat{x}_S(s) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Невязка системы (14) при подстановке в нее (16) определится выражением

$$\begin{bmatrix} r_I \\ r_S \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} G_{II}V & G_{IS} \\ G_{SI}V & G_{SS} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} C_{II}V & C_{IS} \\ C_{SI}V & C_{SS} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{x}_I \\ \hat{x}_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ b_S \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Для однозначного определения редуцированного решения добавим к (17) условия ортогональности вектора внутренней невязки подсхемы ко всем столбцам матрицы проектирования  $V - V \cdot r_I = 0$  и нулевого значения невязки (выполнения законов Кирхгофа) во всех узлах окружения —  $r_S = 0$ . Выполнив эти операции, получим из (17) линейную систему для определения  $\hat{x}$ :

$$\left( \begin{bmatrix} V^T G_{II} V & V^T G_{IS} \\ G_{SI} V & G_{SS} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} V^T C_{II} V & V^T C_{IS} \\ C_{SI} V & C_{SS} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \hat{x}_I \\ \hat{x}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_S \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Полученная система (18) совпадает с (15) при следующих значениях редуцированных матриц:

$$\begin{aligned}\hat{G}_{II} &= V^T G_{II} V, \hat{G}_{SI} = G_{SI} V, \\ \hat{G}_{IS} &= V^T G_{IS}, \hat{G}_{SS} = G_{SS}, \\ \hat{C}_{II} &= V^T C_{II} V, \hat{C}_{SI} = C_{SI} V, \\ \hat{C}_{IS} &= V^T C_{IS}, \hat{C}_{SS} = C_{SS}.\end{aligned}\quad (19)$$

Следует учесть, что элементы матриц  $Y_{SI}$ ,  $Y_{IS}$  могут быть ненулевыми только для граничных ( $B$ ) узлов подсхемы (их число —  $N_B$ ), которые являются общими для подсхемы и ее окружения. Поэтому можно записать

$$\begin{aligned}Y_{SI} &= G_{SI} + sC_{SI} = \begin{bmatrix} Y_{BI} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ Y_{IS} &= G_{IB} + sC_{IS} = [Y_{IB} \ 0].\end{aligned}\quad (20)$$

Тогда матрицы самой подсхемы (включающей все ее внутренние и граничные узлы) будут редуцироваться по формулам, полученным из (19, 20):

$$\begin{aligned}\hat{Y}_{II} &= V^T Y_{II} V; \hat{Y}_{BI} = Y_{BI} V; \\ \hat{Y}_{IB} &= V^T Y_{IB}; \hat{Y}_{BB} = Y_{BB}.\end{aligned}\quad (21)$$

Последнее равенство в (21) показывает, что матрицы между выводами подсхемы ( $G_{BB}$ ,  $C_{BB}$ ) не меняются при редуцировании, что представляется вполне естественным. Матрицы редуцированной подсхемы ( $\hat{Y}^{sub} = \hat{G}^{sub} + s\hat{C}^{sub}$ ) объединяют компоненты, относящиеся ко всем ее узлам:

$$\hat{G}^{sub} = \begin{bmatrix} \hat{G}_{II} & \hat{G}_{IB} \\ \hat{G}_{BI} & G_{BB} \end{bmatrix}, \hat{C}^{sub} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{II} & \hat{C}_{IB} \\ \hat{C}_{BI} & C_{BB} \end{bmatrix}.\quad (22)$$

Для моделирования электрической цепи, включающей (22), нужно сформировать проводимости компонентов подсхемы на основе (12), (22) и присвоить граничным узлам подсхемы имена тех узлов внешней цепи, к которым они подсоединены. Не требуется включать дополнительные узлы и компоненты, подобные приведенным на рис. 1, б (см. вторую сторону обложки).

### 3. Использование формы подсхемы в алгоритмах редуцирования и способы учета нелинейного окружения

Прежде всего отметим, что свойства редуцирования в форме подсхемы (15), (19) ана-

логичны свойствам редуцирования в стандартной форме (4), (5), так как (21), (22) могут быть представлены в эквивалентном виде:

$$\begin{aligned}\hat{G}^{sub} &= \bar{V}^T G^{sub} \bar{V}, \\ \hat{C}^{sub} &= \bar{V}^T C^{sub} \bar{V},\end{aligned}\quad \text{где } \bar{V} = \begin{bmatrix} V & 0 \\ 0 & E_B \end{bmatrix}.\quad (23)$$

Здесь  $E_B$  — единичная матрица размерности  $N_B \times N_B$ . То есть преобразование (21), (23) является конгруэнтным и, следовательно, обеспечивает сохранение положительной определенности матриц и в результате сохранение пассивности.

Для того чтобы теорема о совпадении моментов также сохранялась, нужно, чтобы столбцы матрицы  $V$  составляли базис в пространстве усеченных (до подвекторов) моментов системы (15). Это можно обеспечить нахождением моментов решений (15) и построением ортонормированного базиса в пространстве подвекторов. Следует учесть, что моменты высших порядков для подвекторов могут не образовывать крыловского пространства вида (3), что препятствует непосредственному применению алгоритма Арнольди. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Для методов, не использующих моменты высших порядков (PMTBR, SVS), применение подвекторов трудностей не представляет и практически не меняет структуру алгоритмов.

Необходимо также рассмотреть определение выходных показателей задачи редуцирования. Как было указано выше, включение подсхемы в виде (22) в общую схему проводится естественным путем и не требует задания выходных показателей. Сама процедура редуцирования может использовать значения выходных показателей для оценки погрешности в методах с адаптивным выбором точек, в частности в SVS. Для этого можно задать выход ( $Z$ ) аналогично (1) для внутренних узлов подсхемы ( $Z_I$ ) и узлов окружения ( $Z_S$ ):

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} Z_I \\ Z_S \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_I X_I \\ D_S X_S \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{Z}_I \\ \hat{Z}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{D}_I \hat{X}_I \\ \hat{D}_S \hat{X}_S \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \hat{D}_I \\ \hat{D}_S \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V^T D_I \\ D_S \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (24)$$

Другой вариант учета погрешности не требует явного задания выходных показателей, а включает преобразования (24) в выражения для нормы ошибки.



На практике редуцируемая схема никогда не работает в фиксированном линейном окружении. Поэтому целесообразно обсудить подходы, позволяющие учесть произвольное окружение. Для алгоритма с отбором точек рассмотрим случай, когда внешняя часть схемы представлена несколькими возможными вариантами линейного окружения:

$$G_{SS}^{(i)}, C_{SS}^{(i)}, B_S^{(i)}, D_S^{(i)}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (25)$$

Отметим, что в различных вариантах окружения входные воздействия и выходные показатели могут быть, вообще говоря, различны. Наиболее разумным представляется учет такой многовариантности на каждом шаге алгоритма путем поиска максимума ошибки не только по индексу точки, входного вектора и (при оценке нормы по наихудшей компоненте вектора) выходного показателя (10), но и по индексу варианта окружения.

Задание дискретного набора вариантов окружения для каждого вывода многопортовой схемы может приводить к резкому росту общего числа вариантов и, следовательно, высоких вычислительных затрат. Более практичным представляется возможность задания определенной конфигурации внешнего окружения со значениями параметров, находящихся в заданных пределах. Если определять максимальную ошибку в точке перебором всех вариантов предельных значений параметров, то принципиально этот случай не отличается от предыдущего. Для сокращения затрат возможен подход на основе оценки коэффициентов чувствительности выходных показателей к параметрам окружения для исходной и редуцированной схем. Зная коэффициенты чувствительности и диапазон значений параметров, можно найти оценку наибольшей ошибки аналогично (10), на основе чего определить новый базисный вектор (11).

Решение задачи для заданного диапазона параметров внешнего окружения может послужить основой для решения задачи редуцирования подсхемы в нелинейном окружении. Вообще говоря, окружением линейной подсхемы является вся интегральная схема, но для задачи редуцирования, мы полагаем, в большинстве случаев можно ограничиться соседними компонентами.

Часть нелинейных компонентов можно представлять линейными элементами со значениями в соответствующем диапазоне параметров. Другие компоненты можно представлять набором

источников сигнала, амплитуды и выходные импедансы которых определяются линеаризацией вольт-амперных характеристик компонента в нескольких рабочих точках, определенных на основе предварительного анализа возможных режимов работы нелинейного компонента.

#### 4. Численный эксперимент

Для проверки предложенных модификаций алгоритма редуцирования, учитывающих характеристики схемного окружения, была выбрана схема  $RC$ -линии (рис. 2, см. вторую сторону обложки), содержащей 50 П-образных секций с параметрами  $R = 0,02$  Ом,  $C = 0,05$  пФ. Схемное окружение  $RC$ -линии включает входной источник единичного напряжения  $V = 1$  В с внутренним сопротивлением  $R_S = 0,01$  Ом и емкостную нагрузку, которая меняется вблизи среднего значения  $C_L = 10$  пФ.

В эксперименте сравнивали два способа редуцирования: без учета нагрузки ( $C_L = 0$ ) и с заданием нагрузки  $C_L = 10$  пФ. В результате редукиции с заданием допустимой погрешности  $tol = 0,05$  В (т. е. 5 % от статической ПФ) были получены матрицы проводимостей и емкостей  $4 \times 4$  (с учетом нагрузки) и  $6 \times 6$  (без учета нагрузки). Увеличение порядка объясняется расширением полосы рабочих частот у ПФ линии без нагрузки, что видно из рис. 3, а (см. вторую сторону обложки).

Затем к каждой модели была подключена нагрузка  $C_L = 10$  пФ и получены отклонения их ПФ от ПФ полной модели с той же нагрузкой, показанные на рис. 3, б (см. вторую сторону обложки). Из графиков видно, что учет нагрузки при редукиции обеспечивает снижение ошибки почти вдвое, несмотря на заметно более низкий порядок.

Более подробно сравнение редуцированных моделей в зависимости от заданного допуска на ошибку представлено в табл. 1.

Для каждого значения допуска в таблице приведены значения порядка моделей и значение ошибки ПФ при номинальной нагрузке 10 пФ. В графе 4 показана фактическая ошибка, достигнутая при редукировании в режиме "Без нагрузки". Аналогичная величина для номинального режима совпадает с содержимым графы 5 в этом режиме. В последней графе приведено отношение ошибки модели без учета нагрузки к ошибке модели с учетом реальной нагрузки в процедуре редукиции.

Сравнение моделей при номинальной нагрузке (10 пФ)

№	До- пуск, В	Режим редукиции					Отно- шение ошибок Err0/ErrC
		Без учета нагрузки			Нагрузка 10 пФ		
		Порядок	Погрешн.	Ошибка	Порядок	Ошибка	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10 <sup>-1</sup>	5	7,7·10 <sup>-2</sup>	7,4·10 <sup>-2</sup>	4	3,2·10 <sup>-2</sup>	2,30
2	10 <sup>-2</sup>	7	9,8·10 <sup>-3</sup>	4,6·10 <sup>-2</sup>	5	5,9·10 <sup>-3</sup>	7,68
3	10 <sup>-3</sup>	9	2,1·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-2</sup>	7	4,8·10 <sup>-4</sup>	30,1
4	10 <sup>-4</sup>	10	1,9·10 <sup>-5</sup>	1,1·10 <sup>-2</sup>	9	1,3·10 <sup>-5</sup>	867,5
5	10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-6</sup>	11	7,0·10 <sup>-7</sup>	8,0·10 <sup>-3</sup>	10	6,8·10 <sup>-7</sup>	11 753
6	10 <sup>-7</sup>	12	3,1·10 <sup>-8</sup>	6,2·10 <sup>-3</sup>	11	4,3·10 <sup>-8</sup>	145 110
7	10 <sup>-8</sup>	13	2,3·10 <sup>-9</sup>	4,9·10 <sup>-3</sup>	12	2,2·10 <sup>-9</sup>	2 239 200

Из табл. 1 видно, что выигрыш от генерации модели с учетом реальной нагрузки резко возрастает при усилении требований к точности модели. В данном случае это объясняется тем, что ошибка модели с учетом нагрузки примерно пропорциональна допуску на погрешность, в то время как ошибка модели без учета нагрузки слабо меняется с уменьшением допуска.

Табл. 1 представляет результаты, соответствующие идеальному случаю, когда значение нагрузки точно совпадает со значением, использованным при редуцировании схемы. На практике нам обычно может быть известно среднее значение нагрузки, а ее значение в каждый момент зависит от нелинейности схемы, изменения режима и т. д. Поэтому были проведены эксперименты по оценке точности моделей при отклонении нагрузки ±40 % от номинальной.

В табл. 2 приведены результаты этих экспериментов, показывающие зависимость отклонения ошибок моделей от нагрузки при

Таблица 2

Сравнение при отклонении нагрузки от номинальной

№	C <sub>L</sub> , пФ	Допуск погрешности при редукиции						
		10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>
1	14	3,2	10,9	42,7	1233	11 309	17 153	21 650
2	12	2,8	9,27	36,4	1050	14 141	25 673	32 399
3	10	2,3	7,68	30,1	867,5	11 753	145 110	2 239 200
4	8	1,8	6,09	23,8	685,1	7911	12 025	15 180
5	6	1,4	4,51	17,5	503,9	2338	3549	4480

Таблица 1 различных значения допуска на погрешность. Видно, что, несмотря на некоторое ухудшение по сравнению с точным заданием нагрузки, отношение ошибок показывает высокую эффективность предложенного подхода во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок. Как и в табл. 1, наблюдается существенный рост эффективности подхода при возрастании требований к точности редуцированной модели.

### Заключение

В работе рассмотрены основные этапы развития проекционных методов редуцирования электрических цепей. Показано,

что дальнейший прогресс в понижении избыточности моделей может быть обеспечен за счет учета характеристик схемного окружения редуцируемой схемы. Существующие процедуры предполагают непосредственное подключение источников сигналов к выводам схемы, что часто приводит к повышению порядка модели для обеспечения требуемой точности для режимов, которые никогда не реализуются в рамках конкретного окружения этой схемы. В результате порядок редуцированной подсхемы может оказаться существенно выше минимально необходимого порядка.

Для реализации учета окружения сформулирована задача редуцирования подсхемы линейной электрической схемы. Предложенный алгоритм решения задачи основан на методе Галеркина, используемом при редуцировании схем на основе представления их уравнений в классической форме линейной динамической системы. Отличие предлагаемого подхода состоит в редуцировании системы уравнений Кирхгофа только для внутренних узлов подсхемы. Базис проектирования формируется из векторов состояний подсхем, полученных решением уравнений полной схемы. Адаптивный выбор частотных точек и сигналов источников проводится на основе метода отбора векторов состояния (SVS) и продолжается до достижения заданной точности. Полученная модель подсхемы в виде матриц емкостей и проводимостей может быть включена в любое схемное окружение без дополнения вспомогательными

управляемыми источниками тока или напряжения.

Вычислительные эксперименты по моделированию  $RC$ -линии показали существенное снижение погрешности моделирования за счет учета при редуцировании среднего значения емкости нагрузки.

#### Список литературы

1. Silva J. M. S., Villena J. F., Flores P., Silveira L. M. Outstanding Issues in Model Order Reduction // Scientific Computing in Electrical Engineering, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. P. 139–152.
2. Benner P., Hinze M., Jan E., ter Maten W. (Editors). Model Reduction for Circuit Simulation // Series: Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2011, Vol. 74.
3. Гурарий М. М., Жаров М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л. Методы возмущений и селективные методы в задачах редукции высокоразмерных моделей // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2008. № 1. С. 86–91.
4. Moore B. C. Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability and model reduction // IEEE Trans. Autom. Control, 1981. Vol. AC-26, N. 1. P. 17–32.
5. Pillage L. T., Rohrer R. A. Asymptotic waveform evaluation for timing analysis // IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1990. Vol. 9, N. 4. P. 352–366.
6. Feldmann P., Freund R. W. Efficient linear circuit analysis by Pade approximation via the Lanczos process // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1995. Vol. 14, N. 5. P. 639–649.
7. Silveira L. M., Kamon M., Elfadel I., White J. A coordinate transformed Arnoldi algorithm for generating guaranteed stable reduced order models of RLC circuits // In Proc. ICCAD. November 1996. P. 288–294.
8. Odabasioglu A., Celik M., Pileggi L. T. PRIMA: passive reduced-order interconnect macromodeling algorithm // IEEE Trans. CAD. 1998. Vol. 17, No. 8. P. 645–654.

9. Feldmann P., Freund R. W. Reduced-order modeling of large linear subcircuits via a block Lanczos algorithm // Proc. 32nd ACM/IEEE Design Automation Conf. 1995. P. 474–479.

10. Heres P. J., Schilders W. H. A. Orthogonalisation in Krylov subspace methods for model order reduction // Scientific Computing in Electrical Engineering. Series: Mathematics in Industry. Springer. 2006. Vol. 9. P. 39–44.

11. Nguyen T. V., Li J. Multipoint Pade approximation using a rational block Lanczos algorithm // Proc. of IEEE Int. Conf. on Comp. Aided Design (ICCAD). 1997. P. 72–77.

12. Elfadel I. M., Ling D. L. A block rational Arnoldi algorithm for multipoint passive model-order reduction of multiport RLC networks // Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des. 1997. P. 66–71.

13. Phillips J. R., Silveira L. M. Poor man's TBR: a simple model reduction scheme // IEEE Trans. Comp. Aided Design Integr. Circuits Syst. 2005. Vol. 24. P. 43–55.

14. Gourary M. M., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Model order reduction by state vector selection (SVS) approach // European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). 2013. P. 1–4.

15. Lee Heng-Jer, Chu Chia-Chi, Feng Wu-Shiung. An adaptive-order rational Arnoldi method for model-order reductions of linear time-invariant systems // Linear Algebra and its Applications. 2006. Vol. 415. P. 235–261.

16. De Luca G., Antonini G., Benner P. Parallel Model Order Reduction for Sparse Electromagnetic/Circuit Models // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2015. Vol. 30, N. 1. P. 1–21.

17. Abidi O., Hached M., Jbilou K. Adaptive rational block Arnoldi methods for model reductions in large-scale MIMO dynamical systems // New Trends in Mathematical Sciences. 2016. Vol. 4, N. 2. P. 227–239.

18. Druskin V., Lieberman C., Zaslavsky M. On adaptive choice of shifts in rational Krylov subspace reduction of evolutionary problems // SIAM J. Sci. Comput. 2010. Vol. 32, N. 5. P. 2485–2496.

19. Grimme E. Krylov Projection Methods for Model Reduction, PhD thesis, Coordinated-Science Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana-Champaign, IL, 1997.

20. Бортаковский А. С., Пантелеев А. В. Линейная алгебра в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2005. 591 с.

21. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.

M. M. Gourary, Senior Research Associate, gourary@ippm.ru,

M. M. Zharov, Leading Research Associate, zarov@ippm.ru,

S. G. Rusakov, Principal Research Associate, rusakov@ippm.ru,

S. L. Ulyanov, Principal Research Associate, ulyas@ippm.ru,

Institute for Design Problems in Microelectronics RAS, Moscow, 124365, Russian Federation

## Model Order Reduction of Electrical Circuits Taking Account of External Networks Characteristics

*Main stages of projective model order reduction (MOR) methods for electrical circuits include model construction by Pade approximation, implementation of Krylov subspace methods for essential decrease of computational noise, application of congruent transform to save circuit passivity, using block-Krylov methods for multiport circuits and multipoint rational-Krylov algorithms to mitigate the redundancy of reduced models. The considerable drop in the redundancy was achieved by applying singular value decomposition and by adaptive choosing the expansion points to be used for the moment matching. Thus, further progress in redundancy elimination cannot be provided by the modifications improvement of basis construction algorithms, and other directions to decrease redundancy should be considered. Known methods suppose direct connection of signal sources to network ports, thus resulting in the network solutions that often cannot exist in the framework of real surrounding. Then the reduction*

algorithm to provide required accuracy for such solutions excessively increases the model order. So, taking account of external circuitry in MOR procedures is the promising approach to minimize the order of reducing network. To take surrounding into account the MOR problem for the subcircuit of linear electrical circuit is considered. The problem solving is based on Galerkin method similarly with standard approach for linear dynamical system. Departing from that approach, the proposed method reduces Kirchhoff equations for the subcircuit internal nodes only. The projective basis is generated in the space of the subcircuit state vectors obtained by evaluations of the whole circuit. The reduced model presented by admittance matrix with the saved set of the subcircuit boundary nodes can be directly included in any electrical network. Numerical simulation of RC-line and its reduced versions demonstrated essential decrease of the error if the average capacitance load is taken into account.

**Keywords:** electronic design automation, model order reduction, circuit simulation, linear subcircuit, projection matrix, Krylov subspace

DOI: 10.17587/it.24.563-572

### References

1. Silva J. M. S., Villena J. F., Flores P., Silveira L. M. *Outstanding Issues in Model Order Reduction*, Scientific Computing in Electrical Engineering, Berlin Heidelberg, Springer, Germany, 2007, pp. 139–152.
2. Benner P., Hinze M., Jan E., ter Maten W. (Editors) *Model Reduction for Circuit Simulation*, Series: Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, 2011, Vol. 74.
3. Gourary M. M., Zharov M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L. Metody vozmushhenij i selektivnye metody v zadachah redukcii vysokorazmernyh modelej (Perturbation methods and selective methods in problems of a reduction of high-dimension models), *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2008, no. 1, pp. 86–91 (in Russian).
4. Moore B. C. Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability and model reduction, *IEEE Trans. Autom. Control*, 1981, vol. AC-26, no. 1, pp. 17–32.
5. Pillage L. T., Rohrer R. A. Asymptotic waveform evaluation for timing analysis, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, 1990, vol. 9, no. 4, pp. 352–366.
6. Feldmann P., Freund R. W. Efficient linear circuit analysis by Pade approximation via the Lanczos process, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1995, vol. 14, no. 5, pp. 639–649.
7. Silveira L. M., Kamon M., Elfadel I., White J. A coordinate transformed Arnoldi algorithm for generating guaranteed stable reduced order models of RLC circuits, *In Proc. ICCAD*, November 1996, pp. 288–294.
8. Odabasioglu A., Celik M., Pileggi L. T. PRIMA: passive reduced-order interconnect macromodeling algorithm, *IEEE Trans. CAD*, 1998, vol. 17, no. 8, pp. 645–654.
9. Feldmann P., Freund R. W. Reduced-order modeling of large linear subcircuits via a block Lanczos algorithm, *Proc. 32nd ACM/IEEE Design Automation Conf.*, 1995, pp. 474–479.
10. Heres P. J., Schilders W. H. A. Orthogonalisation in Krylov subspace methods for model order reduction, *In Scientific Computing in Electrical Engineering, Series: Mathematics in Industry*, Springer, 2006, vol. 9, pp. 39–44.
11. Nguyen T. V., Li J. Multipoint Pade approximation using a rational block Lanczos algorithm, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Comp. Aided Design (ICCAD)*, 1997, pp. 72–77.
12. Elfadel I. M., Ling D. L. A block rational Arnoldi algorithm for multipoint passive model-order reduction of multiport RLC networks, *In Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des.*, 1997, pp. 66–71.
13. Phillips J. R., Silveira L. M. Poor man's TBR: a simple model reduction scheme, *IEEE Trans. Comp. Aided Design Integr. Circuits Syst.*, 2005, vol. 24, pp. 43–55.
14. Gourary M. M., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Model order reduction by state vector selection (SVS) approach, *European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2013, pp. 1–4.
15. Lee Herng-Jer, Chu Chia-Chi, Feng Wu-Shiung. An adaptive-order rational Arnoldi method for model-order reductions of linear time-invariant systems, *Linear Algebra and its Applications*, 2006, vol. 415, pp. 235–261.
16. De Luca G., Antonini G., Benner P. Parallel Model Order Reduction for Sparse Electromagnetic/Circuit Models, *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 1–21.
17. Abidi O., Hached M., Jbilou K. Adaptive rational block Arnoldi methods for model reductions in large-scale MIMO dynamical systems, *New Trends in Mathematical Sciences*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 227–239.
18. Druskin V., Lieberman C., Zaslavsky M. On adaptive choice of shifts in rational Krylov subspace reduction of evolutionary problems, *SIAM J. Sci. Comput.* 2010, vol. 32, no. 5, pp. 2485–2496.
19. Grimme E. *Krylov Projection Methods for Model Reduction*, PhD thesis, Coordinated-Science Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL, 1997.
20. Bortakovskij A. S., Pantelev A. V. *Linejnaja algebra v primerah i zadachah* (Linear algebra in examples and problems). Moscow, Vysshaja shkola, 2005. 591 pp. (in Russian).
21. Vlach J., Singhal K. Mashinnye metody analiza i proektirovanija jelektronnyh shem (Computer methods for Circuit Analysis and Design), Moscow, Radio i svyaz, 1988, 560 p. (in Russian).

**И. П. Денисова**, д-р физ.-мат. наук, проф., kaf.pmitet.mai@yandex.ru,  
**Ю. А. Костиков**, канд. физ.-мат. наук, доц., kaf.pmitet.mai@yandex.ru,  
**М. В. Лебедева**, ст. преподаватель, kaf.pmitet.mai@yandex.ru,  
**М. А. Пасисниченко**, ассистент, kaf.pmitet.mai@yandex.ru

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

## Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение системы лазерной локации космических аппаратов с использованием подвижного телескопа

*Построена математическая модель локации космического аппарата, обращающегося по круговой орбите, с использованием лазерной станции, находящейся на поверхности вращающейся Земли.*

*Разработаны алгоритм и программное обеспечение для проведения лазерной локации при наличии подвижного приемного телескопа. Показано, что если двигать приемный телескоп так, чтобы в него попадали центры отраженных импульсов, то эффективность локации значительно возрастает по сравнению с использованием неподвижного телескопа.*

**Ключевые слова:** математическая модель лазерной локации, ретрорефлектор, алгоритм, программное обеспечение, базы данных, система Глонавс, принятие решения

### Введение

В последнее время в научной литературе [1–4] активно обсуждаются различные аспекты использования лазерных систем в космических исследованиях. Это связано в основном с тем, что лазерная локация космических аппаратов позволяет обеспечить повышенную точность измерений по сравнению с радиолокацией [5]. Поэтому в научной литературе не только изучаются возможности использования лазерных систем для определения дальности в привычном проектом облике лазерных станций, но и рассматриваются математические модели [6–9], необходимые для создания лазерных станций нового поколения и лазерных систем, предназначенных для выполнения операций сближения и стыковки [10–12] космических аппаратов.

Для высокоточного контроля параметров орбит космических аппаратов требуется прецизионная система наведения лазерного луча на отражатели космического аппарата, а также наличие достаточного количества отраженных световых импульсов в приемном телескопе лазерной станции. На космических аппаратах для отражения световых импульсов используют ретрорефлекторы [13]. Ретрорефлектор в системе отсчета, в которой он покоится, отражает световые импульсы в направлениях, прямо противоположных направлениям, по которым они приходят к ретрорефлектору. Так как лазерная станция находится в неинерци-

альной системе отсчета, а ретрорефлектор движется, то в силу основных принципов общей теории относительности Эйнштейна закон отражения световых импульсов будет другим [14, 15]. Как показано в работах [6, 16], угол между лучом, по которому световой импульс приходит к ретрорефлектору искусственного спутника Земли (ИСЗ), и лучом, по которому отраженный импульс возвращается к Земле, в общем случае должен быть не равен нулю (так называемая скоростная абберация). Поэтому центр пятна, образованного на поверхности Земли отраженным световым импульсом, даже если пренебречь вращением Земли, в общем случае будет двигаться по поверхности Земли [8, 9], находясь на некотором расстоянии от оси приемного телескопа лазерной станции. Вращение Земли вокруг своей оси также вносит свой вклад в этот эффект. Интенсивность отраженного светового импульса в его поперечном сечении убывает при удалении от его центра к периферии [17] по закону

$$\sigma(\eta) = \sigma_0 \left( \frac{2J_1(\eta)}{\eta} \right)^2, \quad (1)$$

где  $J_1(\eta)$  — функция Бесселя первого порядка,  $\eta = \pi D \sin \alpha / \lambda$ ;  $\alpha$  — угол между исследуемым лучом и центральным лучом отраженного пучка лучей;  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения;  $D$  — диаметр выходной апертуры отражателя. Поэтому согласно выражению (1) на приемный

телескоп лазерной станции при локации выскоорбитальных ИСЗ попадает лишь малая часть отраженного импульса, недостаточная для регистрации времени его прибытия.

### Особенности лазерной локации космических аппаратов с использованием подвижного телескопа

Значение принимаемой световой энергии можно увеличить, если приемный телескоп отделить от лазерной станции и передвигать его за центрами пятен отраженных импульсов. Лазерных станций с подвижным телескопом в настоящее время не существует, ведется лишь математическое моделирование этого нового способа локации, выясняются преимущества и недостатки, а также прорабатываются вопросы, необходимые для создания компьютерных систем управления. Предполагается, что в этой лазерной станции нового поколения система формирования лазерного импульса и система регистрации времени его излучения вместе с передающим телескопом находятся в покое на локационном полигоне. Приемный же телескоп вместе с системой регистрации времени прихода отраженных импульсов размещается на специальной платформе, которая может передвигаться по локационному полигону в зависимости от движения центров пятен отраженных световых импульсов. Для управления движением этой платформы и регистрации координат точек приема и времени приема отраженных световых импульсов необходимо создать адекватную компьютерную систему с программным обеспечением. Эта задача и решается в данной работе.

Таким образом, процесс лазерной локации космического аппарата с использованием подвижного приемного телескопа может быть описан кратко: лазерный луч, выпущенный из неподвижного передающего телескопа лазерной станции, попадает на ретрорефлектор космического аппарата, отражается и принимается уже подвижным приемным телескопом, после чего сигнал обрабатывается на компьютере.

Используя предварительные результаты, полученные в работах [6—9] при исследовании некоторых частных вопросов, построим математическую модель и опишем программный комплекс, необходимый для реализации этого нового способа лазерной локации, который

можно использовать при создании лазерных станций нового поколения.

### Математическая модель процесса лазерной локации с подвижным приемным телескопом

Предположим, что лазерная станция находится на поверхности Земли в точке со сферическими координатами  $R_0$ ,  $\theta_0$  и  $\varphi_0$ . Введем топоцентрическую систему отсчета, поместив начало системы координат в эту точку, направив ось  $OZ$  по местной вертикали, ось  $OX$  — по касательной к меридиану, ось  $OY$  — по касательной к параллели. Эта система отсчета является неинерциальной.

Предположим далее, что лазерная станция испустила световой импульс в направлении космического аппарата, находящегося на круговой орбите радиуса  $R_s$ . Этот импульс в некоторый момент времени отражается от ретрорефлекторов космического аппарата, после чего возвращается на Землю и образует на ее поверхности пятно некоторого радиуса  $r_0$ . В процессе локации последовательностью импульсов, выпущенных лазерной станцией, центры этих пятен будут попадать в разные точки земной поверхности, образуя прерывистую кривую.

Целью расчетов являются определение координат центров этих пятен в топоцентрической системе отсчета и вычисление скорости их движения по поверхности Земли.

Приведем основные уравнения математической модели, необходимые для решения поставленной задачи. Ими являются уравнения движения испущенных и отраженных лазерных импульсов, а также закон движения космического аппарата по круговой орбите.

В топоцентрической системе отсчета распространение электромагнитных сигналов согласно работам [8, 9] описывается уравнениями, вытекающими из уравнений общей теории относительности:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2K\dot{y} \cos \theta_0 - K^2[x \cos \theta_0 + \\ + (z + R_0) \sin \theta_0] \cos \theta_0 &= 0; \\ \ddot{y} + 2K[\dot{x} \cos \theta_0 + \dot{z} \sin \theta_0] - K^2 y &= 0; \\ \ddot{z} - 2K\dot{y} \sin \theta_0 - K^2[x \cos \theta_0 + \\ + (z + R_0) \sin \theta_0] \sin \theta_0 &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где точкой обозначена производная по  $x^0 = ct$ ,  $K = \frac{\Omega}{c}$ ,  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли.

Эта система уравнений имеет, как известно, первый интеграл:

$$\begin{aligned} \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + K^2\{[x \cos \theta_0 + \\ + (z + R_0) \sin \theta_0]^2 + y^2\} - 2K\{\dot{x}y \cos \theta_0 - \\ - y[x \cos \theta_0 + (z + R_0) \sin \theta_0] + \dot{z}y \sin \theta_0\} = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение уравнений (2)—(3) имеет различный вид для испущенных и отраженных лазерных импульсов вследствие разных начальных условий.

Движение космического аппарата по круговой орбите радиуса  $R_s$  в топоцентрической системе отсчета описывается следующими уравнениями [18, 19]:

$$\begin{aligned} x_s(t) &= R_s\{\cos(\omega t + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\} \cos \theta_0 - \\ &- \sin \theta \sin \theta_0 \sin(\omega t + \psi_0); \\ y_s(t) &= R_s\{\cos \theta \sin(\omega t + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) - \\ &- \cos(\omega t + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)\}; \\ z_s(t) &= R_s\{\sin \theta \cos \theta_0 \sin(\omega t + \psi_0) + \\ &+ [\cos(\omega t + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)] \sin \theta_0\} - R_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega = \sqrt{GM/R_s^3}$  — угловая скорость обращения космического аппарата по круговой орбите;  $GM$  — произведение гравитационной постоянной и массы Земли;  $\theta$  — наклонение орбиты;  $\varphi$  — долгота восходящего узла;  $\psi_0$  — угловое расстояние космического аппарата в момент времени  $t = 0$  от узла.

Для уменьшения погрешностей, вносимых неоднородностью атмосферы, рабочими при лазерной локации считаются участки небесной сферы, расположенные на  $20^\circ$  выше местного горизонта. Условие локации на  $20^\circ$  выше местного горизонта в топоцентрической системе отсчета принимает вид:

$$z_s(t) > \sqrt{x_s(t)^2 + y_s(t)^2 + z_s(t)^2} \cos 70^\circ. \quad (5)$$

Используя уравнения (3), (4), найдем движение лазерного импульса к космическому аппарату. Предположим, что космический аппарат появляется в области локации (5) в момент времени  $t_b$ . Тогда момент времени, в который лазерная станция испустит  $N$ -й световой импульс, будет определяться соотношением:

$$t_N = t_b + N\Delta T,$$

где  $\Delta T$  — промежуток времени между излучением двух последовательных импульсов, а  $N = 1, 2, 3, \dots$

Следуя работе [9], запишем решение уравнений (3)—(4) в виде пучка лучей, выходящих в момент времени  $t = t_N$  из лазерной станции:

$$\begin{aligned} x_L(t) &= R_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 [\cos \Omega(t - t_N) - 1] + \\ &+ c(t - t_N)\{[n_x \cos[\Omega(t - t_N) + \varphi_0]] + \\ &+ n_y \sin[\Omega(t - t_N) + \varphi_0]\} \cos \theta_0 - n_z \sin \theta_0; \\ y_L(t) &= -R_0 \sin \theta_0 \sin \Omega(t - t_N) - \\ &- c(t - t_N)[n_x \sin[\Omega(t - t_N) + \varphi_0] - \\ &- n_y \cos[\Omega(t - t_N) + \varphi_0]]; \\ z_L(t) &= R_0 \sin^2 \theta_0 [\cos \Omega(t - t_N) - 1] + \\ &+ c(t - t_N)\{[n_x \cos[\Omega(t - t_N) + \varphi_0] + \\ &+ n_y \sin[\Omega(t - t_N) + \varphi_0]] \sin \theta_0 + n_z \cos \theta_0\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n_x, n_y, n_z$  — постоянные интегрирования, определяющие ориентацию луча в пространстве. Подставляя выражения (6) в первый интеграл (3), получим условие, которому они должны удовлетворять:

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1. \quad (7)$$

В некоторый момент времени  $t = t_r$  один из лучей (6) попадает на ретрорефлектор космического аппарата. Это означает, что в этот момент времени должно выполняться равенство:

$$x_L(t_r) = x_s(t_r), y_L(t_r) = y_s(t_r), z_L(t_r) = z_s(t_r).$$

Решим эти уравнения относительно  $n_x, n_y, n_z$ :

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{1}{c(t_r - t_N)} \{R_s [\cos(\Omega t_N - \varphi) \cos(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ \sin(\Omega t_N - \varphi) \sin(\omega t_r + \psi_0) \cos \theta] - \\ &- R_0 \sin \theta_0 \cos \varphi_0\}; \\ n_y &= \frac{1}{c(t_r - t_N)} \{R_s [\cos(\Omega t_N - \varphi) \times \\ &\times \sin(\omega t_r + \psi_0) \cos \theta - \sin(\Omega t_N - \varphi) \times \\ &\times \cos(\omega t_r + \psi_0)] - R_0 \sin \theta_0 \sin \varphi_0\}; \\ n_z &= \frac{R_s \sin \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) - R_0 \cos \theta_0}{c(t_r - t_N)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставим эти соотношения в выражение (7). В результате получим уравнение:

$$\begin{aligned} c^2(t_r - t_N)^2 &= R_s^2 + R_0^2 - 2R_s R_0 \{\sin \theta_0 \times \\ &\times [\cos(\omega t_r + \psi_0) \cos(\Omega t_N + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) \sin(\Omega t_N + \varphi_0 - \varphi)] + \\ &+ \cos \theta_0 \sin \theta \sin(\omega t_r + \psi_0)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Решая численно это трансцендентное уравнение, найдем момент времени  $t = t_r$  отражения  $N$ -го лазерного импульса от космического аппарата.

Рассмотрим теперь отражение лазерного импульса от движущегося к Земле космического аппарата. В работе [16] было показано, что в геоцентрической невращающейся системе отсчета вектор скорости отраженного светового импульса  $\mathbf{V}_{ref}$  определяется следующим образом:

$$\mathbf{V}_{ref} = 2\mathbf{V}_r - 2(\mathbf{V}_{(ph)}\mathbf{V}_r)\mathbf{V}_{(ph)}/c^2 + O(\mathbf{V}_r^2/c^2)\mathbf{V}_{(ph)}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{V}_r$  — вектор скорости космического аппарата;  $\mathbf{V}_{(ph)}$  — вектор скорости импульса, испущенного лазерной станцией.

Именно в силу этого релятивистского соотношения [20] и возникают угловые искажения [21] в законе отражения движущегося ретро-рефлектора. Поэтому перейдем от координат  $x, y, z$  топоцентрической системы отсчета к координатам  $x^{(4)}, y^{(4)}, z^{(4)}$  невращающейся геоцентрической системы отсчета:

$$\begin{aligned} x^{(4)} &= [x \cos \theta_0 + (z + R_0) \sin \theta_0] \cos(\Omega t + \varphi_0) - \\ &- y \sin(\Omega t + \varphi_0); \\ y^{(4)} &= [x \cos \theta_0 + (z + R_0) \sin \theta_0] \sin(\Omega t + \varphi_0) + \\ &+ y \cos(\Omega t + \varphi_0); \\ z^{(4)} &= -x \sin \theta_0 + (z + R_0) \cos \theta_0. \end{aligned}$$

Подставляя эти соотношения в выражения (6), найдем в невращающейся геоцентрической системе отсчета уравнение луча, по которому световой импульс движется от лазерной станции к космическому аппарату:

$$\begin{aligned} x_L^{(4)}(t) &= R_0 \sin \theta_0 \cos(\Omega t_N + \varphi_0) + \\ &+ c(t - t_N)[n_x \cos \Omega t_N - n_y \sin \Omega t_N]; \\ y_L^{(4)}(t) &= R_0 \sin \theta_0 \sin(\Omega t_N + \varphi_0) + \\ &+ c(t - t_N)[n_x \sin \Omega t_N + n_y \cos \Omega t_N]; \\ z_L^{(4)}(t) &= R_0 \cos \theta_0 + c(t - t_N)n_z, \end{aligned}$$

где компоненты вектора  $\mathbf{n}$  заданы выражениями (8).

Компоненты вектора скорости лазерного импульса  $\mathbf{V}_{(ph)}$  в этой системе отсчета в момент времени  $t = t_r$  определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} V_{(ph)}^x(t_r) &= \frac{dx_L^{(4)}(t)}{dt} \Big|_{t=t_r} = \\ &= \frac{1}{(t_r - t_N)} \{ R_S [\cos \varphi \cos(\omega t_r + \psi_0) - \\ &- \sin \varphi \sin(\omega t_r + \psi_0) \cos \theta] - \\ &- R_0 \sin \theta_0 \cos(\Omega t_N + \varphi_0) \}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_{(ph)}^y(t_r) &= \frac{dy_L^{(4)}(t)}{dt} \Big|_{t=t_r} = \\ &= \frac{1}{(t_r - t_N)} \{ R_S [\sin \varphi \cos(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ \cos \varphi \sin(\omega t_r + \psi_0) \cos \theta] - \\ &- R_0 \sin \theta_0 \sin(\Omega t_N + \varphi_0) \}; \\ V_{(ph)}^z(t_r) &= \frac{dz_L^{(4)}(t)}{dt} \Big|_{t=t_r} = \\ &= \frac{R_S \sin \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) - R_0 \cos \theta_0}{(t_r - t_N)}. \end{aligned}$$

Найдем теперь закон движения космического аппарата по круговой орбите в невращающейся геоцентрической системе отсчета:

$$\begin{aligned} x_S^{(4)}(t) &= R_S [\cos \varphi \sin(\omega t + \psi_0) - \\ &- \sin \varphi \cos \theta \sin(\omega t + \psi_0)]; \\ y_S^{(4)}(t) &= R_S [\sin \varphi \cos(\omega t + \psi_0) + \\ &+ \cos \varphi \cos \theta \sin(\omega t + \psi_0)]; \\ z_S^{(4)}(t) &= R_S \sin \theta \sin(\omega t + \psi_0)]. \end{aligned}$$

Компоненты вектора скорости космического аппарата  $\mathbf{V}_r$  в этой системе отсчета можно найти, дифференцируя эти выражения по времени и подставляя в них  $t = t_r$ :

$$\begin{aligned} V_r^x(t_r) &= -\omega R_S [\cos \varphi \sin(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ \sin \varphi \cos \theta \cos(\omega t_r + \psi_0)]; \\ V_r^y(t_r) &= \omega R_S [\cos \varphi \cos \theta \cos(\omega t_r + \psi_0) - \\ &- \sin \varphi \sin(\omega t_r + \psi_0)]; \\ V_r^z(t_r) &= \omega R_S \sin \theta \cos(\omega t_r + \psi_0). \end{aligned} \quad (12)$$

Эти соотношения позволяют получить явный вид для компонент вектора скорости отраженного лазерного импульса  $\mathbf{V}_{ref}$  в невращающейся геоцентрической системе отсчета.

Рассмотрим теперь движение отраженного лазерного импульса от космического аппарата к Земле. В невращающейся геоцентрической системе отсчета свет распространяется, как известно, прямолинейно.

Движение центра отраженного светового импульса в этой системе отсчета будет происходить вдоль вектора скорости  $\mathbf{V}_{ref}$ , начинаясь при  $t = t_r$  в точке  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s^{Geo}(t_r)$ :

$$\begin{aligned} x_{ref}^{(4)}(t) &= x_S^{(4)}(t_r) + V_{ref}^x(t_r)(t - t_r); \\ y_{ref}^{(4)}(t) &= y_S^{(4)}(t_r) + V_{ref}^y(t_r)(t - t_r); \\ z_{ref}^{(4)}(t) &= z_S^{(4)}(t_r) + V_{ref}^z(t_r)(t - t_r). \end{aligned}$$



Используя соотношения

$$\begin{aligned} x &= [x^{(4)} \cos(\Omega t + \varphi_0) + \\ &+ y^{(4)} \sin(\Omega t + \varphi_0)] \cos \theta_0 - z^{(4)} \sin \theta_0; \\ y &= -x^{(4)} \sin(\Omega t + \varphi_0) + y^{(4)} \cos(\Omega t + \varphi_0); \\ z &= [x^{(4)} \cos(\Omega t + \varphi_0) + \\ &+ y^{(4)} \sin(\Omega t + \varphi_0)] \sin \theta_0 + z^{(4)} \cos \theta_0 - R_0, \end{aligned}$$

связывающие координаты  $x, y, z$  топоцентрической системы отсчета с координатами  $x^{(4)}, y^{(4)}, z^{(4)}$  невращающейся геоцентрической системы отсчета, найдем закон движения  $r = r_{ref}(t) = \{x_{ref}(t), y_{ref}(t), z_{ref}(t)\}$  центра отраженного лазерного импульса в системе отсчета, связанной с лазерной станцией:

$$\begin{aligned} x_{ref}(t) &= R_S \{ [\cos(\omega t_r + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)] \cos \theta_0 - \\ &- \sin \theta \sin \theta_0 \sin(\omega t_r + \psi_0) + (t - t_r) \{ [V_{(ref)}^x(t_r) \times \\ &\times \cos(\Omega t + \varphi_0) + V_{(ref)}^y(t_r) \sin(\Omega t + \varphi_0)] \cos \theta_0 - \\ &- V_{(ref)}^z(t_r) \sin \theta_0 \}; \\ y_{ref}(t) &= R_S [\cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) - \\ &- \cos(\omega t_r + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)] + (t - t_r) \times \\ &\times [V_{(ref)}^y(t_r) \cos(\Omega t + \varphi_0) - V_{(ref)}^x(t_r) \sin(\Omega t + \varphi_0)]; \\ z_{ref}(t) &= R_S \{ \sin \theta \cos \theta_0 \sin(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ [\cos(\omega t_r + \psi_0) \cos(\Omega t + \varphi_0 - \varphi) + \\ &+ \cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) \sin(\Omega t + \varphi_0 - \varphi)] \sin \theta_0 \} + \\ &+ (t - t_r) \{ [V_{(ref)}^x(t_r) \cos(\Omega t + \varphi_0) + V_{(ref)}^y(t_r) \times \\ &\times \sin(\Omega t + \varphi_0)] \sin \theta_0 + V_{(ref)}^z(t_r) \cos \theta_0 \} - R_0. \end{aligned} \quad (13)$$

В некоторый момент времени  $t = t_f(N)$  центр  $N$ -го лазерного импульса достигнет поверхности Земли и его расстояние от центра Земли будет равно радиусу Земли. В топоцентрической системе отсчета это условие дает уравнение:

$$x_{ref}(t_f(N))^2 + y_{ref}(t_f(N))^2 + [z_{ref}(t_f(N)) + R_0]^2 = R_0^2.$$

Подставляя в это уравнение соотношения (16), приведем его к виду:

$$\begin{aligned} &c^2(t_f(N) - t_r)^2 + \\ &+ 2(t_f(N) - t_r) R_S \{ V_{(ref)}^z(t_r) \sin \theta \sin(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ V_{(ref)}^x(t_r) [\cos \varphi \cos(\omega t_r + \psi_0) - \\ &- \sin \varphi \cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0)] + \\ &+ V_{(ref)}^y(t_r) [\sin \varphi \cos(\omega t_r + \psi_0) + \\ &+ \cos \varphi \cos \theta \sin(\omega t_r + \psi_0)] \} + R_S^2 - R_0^2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Решая численно это уравнение относительно  $t_f(N)$  и выбирая из двух его корней наименьший, найдем время  $t_f(N)$  достижения центром отраженного светового импульса точки поверхности Земли, ближайшей к космическому аппарату.

Квадрат расстояния  $R^2$  от лазерной станции ( $x = 0, y = 0, z = 0$ ) до центра пятна  $x = x_{ref}(t_f(N)), y = y_{ref}(t_f(N)), z = z_{ref}(t_f(N))$ , образуемого отраженным световым импульсом на поверхности Земли, можно найти по формуле

$$R^2 = [x_{ref}(t_f(N))]^2 + [y_{ref}(t_f(N))]^2 + [z_{ref}(t_f(N))]^2. \quad (15)$$

Полученные формулы позволяют найти и скорости движения центров пятен по поверхности Земли. Так как локация космических аппаратов проводится импульсными лазерами [6] с частотой повторения импульсов до  $10^3$  Гц, то между излучением двух последовательных импульсов проходит время  $\Delta T = 10^{-3}$  с. Поэтому центры пятен, создаваемых отраженными от космического аппарата импульсами, будут двигаться по поверхности Земли не непрерывно, а дискретно. В качестве скорости движения центров световых импульсов по поверхности Земли примем отношение разности координат центров пятен, образуемых на Земле двумя последовательными импульсами  $N$ -м и  $(N + 1)$ -м, к промежутку времени между их прибытиями:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{x_{ref}(t_f(N+1)) - x_{ref}(t_f(N))}{[t_f(N+1) - t_f(N)]}; \\ V_y &= \frac{y_{ref}(t_f(N+1)) - y_{ref}(t_f(N))}{[t_f(N+1) - t_f(N)]}; \\ V_z &= \frac{z_{ref}(t_f(N+1)) - z_{ref}(t_f(N))}{[t_f(N+1) - t_f(N)]}. \end{aligned} \quad (16)$$

Именно с такой средней скоростью должен двигаться по поверхности Земли приемный телескоп из точки  $r_{ref}(t_{N+1})$  в точку  $r_{ref}(t_N)$ , чтобы в него попадали центры пятен этих двух импульсов.

Построенная математическая модель (3)—(16) лазерной локации с поверхности вращающейся Земли дает все необходимое для разработки компьютерной системы управления работой лазерной станции с подвижным телескопом.

#### Алгоритмическое обеспечение процесса лазерной станции с подвижным приемным телескопом

Приведем кратко пошаговый алгоритм для созданной математической модели.

1. Ввод исходных данных.
2. Определение момента времени  $t_b$  появления космического аппарата в области локации с использованием формул (4), (5).
3. Определение момента времени  $t_1$  запуска первого светового импульса ( $N = 1$ ) из формулы  $t_N = t_b + N\Delta T$  при заданном  $\Delta T$ .
4. Решая численно уравнение (9), находим момент времени  $t_r$  отражения первого импульса от ретрорефлектора.
5. По формуле (11) определяем компоненты вектора скорости лазерного импульса в невращающейся геоцентрической системе отсчета.
6. По формуле (12) определяем компоненты вектора скорости космического аппарата в этой же системе отсчета.
7. По формуле (10) вычисляем компоненты вектора скорости отраженного светового импульса в геоцентрической невращающейся системе отсчета.
8. Численно решая относительно  $t_f(N)$  уравнение (14), находим два корня и, выбирая из двух корней наименьший, найдем время  $t_f(N)$  достижения центром отраженного импульса точки поверхности Земли, ближайшей к космическому аппарату.
9. После этого, подставляя в выражение (13)  $t = t_f(N)$ , найдем координаты  $x_{ref}(t = t_f(N))$ ,  $y_{ref}(t = t_f(N))$ ,  $z_{ref}(t = t_f(N))$  центра пятна первого и последующих импульсов:  $N = 1, 2, \dots$
10.  $t_N$ ,  $x_{ref}$ ,  $y_{ref}$ ,  $z_{ref}$  передаем на дисплей водителя подвижной части телескопа. По формуле (16) определяем минимально необходимую скорость для того, чтобы прибыть в точку к приходу следующего отраженного импульса раньше его.
11. Водитель, используя Глонасс, перемещает автомобиль в точку с координатами  $x_{ref}$ ,  $y_{ref}$ ,  $z_{ref}$ , после чего в момент времени  $t_f(N)$  подвижный телескоп принимает отраженный световой импульс и регистрирует время его прихода по всемирному времени UT. После этого для определения места нахождения подвижного телескопа в точке, куда должен попасть центр второго отраженного импульса, вся процедура повторяется заново. Для какого-то импульса с номером  $N$  условие локации (5) перестает выполняться и, используя формулы (4), (5), определяется момент времени следующего появления космического аппарата в области локации. На этом данный сеанс локации заканчивается.

## Программное обеспечение процесса лазерной станции с подвижным приемным телескопом

Для проведения численных расчетов по описанному алгоритму был создан программный комплекс. Компонентами этого комплекса являются:

1. LRPROG1. Эта компонента реализована на языке программирования C++. Данная компонента проводит расчет времени вхождения космического аппарата в зону видимости лазерной станции, проводит расчет времени и координат прихода центров отраженных пятен.

2. LRPROG2. Эта компонента реализована на языке программирования Qt. Регистрирует время старта каждого лазерного импульса с записью в базу данных.

3. LRPROG3. Эта компонента реализована на языке программирования Qt. Компонента опрашивает систему Глонасс и определяет координаты и время текущего местоположения подвижного телескопа, просчитывает маршрут к центру первого пятна, дает команду исполнительному устройству на начало движения и контролирует процесс движения, используя связь с Глонасс. Далее регистрирует время прихода каждого отраженного импульса и прокладывает маршрут движения подвижного телескопа к последующему  $N$ -му центру пятна. Все полученные данные хранит в базе данных подвижного телескопа.

### Апробация разработанного алгоритма и программного обеспечения системы лазерной локации методом компьютерного моделирования

С использованием разработанной компьютерной системы были проведены имитационные эксперименты по принятию решений на осуществление требуемого местоположения подвижного телескопа лазерной станции при локации космических аппаратов, показавшие хорошие результаты. В качестве высокоорбитального ИСЗ [22] при проведении численных расчетов был выбран ИСЗ "Compass-MS2" (высота орбиты 21 528 км, наклонение 55°), имеющий на внешних панелях уголкового лазерного отражателя. В качестве низкоорбитального ИСЗ был выбран "Larets" (высота орбиты 691 км, наклонение 98,204°). В качестве лазерных станций были выбраны Качивели (44,3932° северной широты, 33,9701° восточной долготы,

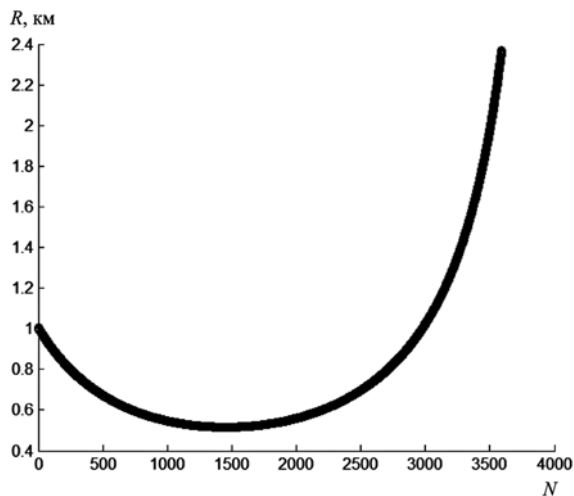


Рис. 1. Расстояние  $R$  между неподвижной лазерной станцией и подвижным телескопом (в км) в зависимости от номера импульса  $N$  при локации ИСЗ "Compass-MS2"

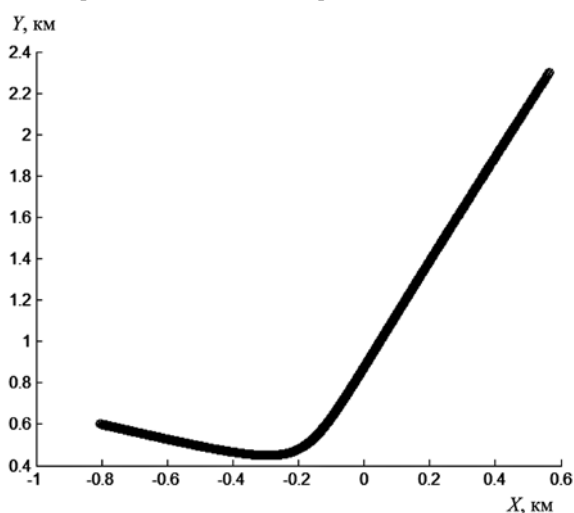


Рис. 2. Траектория на поверхности Земли (в плоскости XOY) центров пятен отраженных световых импульсов при локации ИСЗ "Compass-MS2". Расстояния вдоль осей даны в километрах

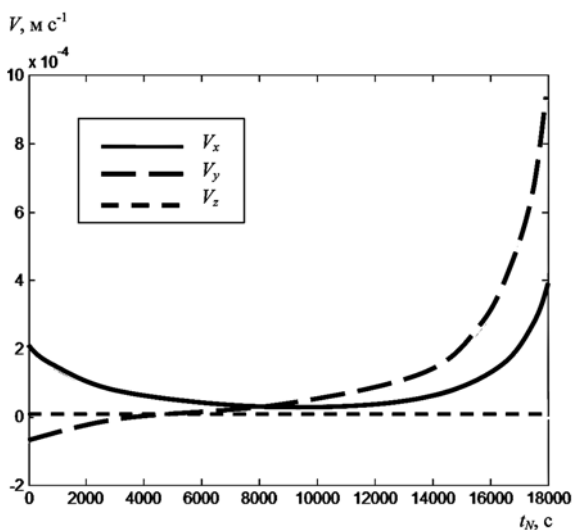


Рис. 3. Зависимость компонент скорости центров пятен (в м/с) от времени  $t_N$  в пределах одного сеанса локации ИСЗ "Compass-MS2"

высота над уровнем геоида 68,7 м) и Светлое (60,5332° северной широты, 29,7805° восточной долготы, высота над уровнем геоида 69 м).

Как показали расчеты, существенное влияние на значение отклонения центра пятна от лазерной станции (16) оказывает радиус орбиты космического аппарата. Так, например, при локации ИСЗ "Compass-MS2" в зависимости от положения ИСЗ в области локации (3) это расстояние изменяется от 200 до 1100 м (рис. 1).

Для низкоорбитальных ИСЗ расстояние от центров пятен отраженных световых импульсов до лазерной станции оказывается меньше, чем для высокоорбитальных ИСЗ, — от 50 до 200 м.

Линия, образованная центрами отраженных световых импульсов на поверхности Земли при локации ИСЗ "Compass-MS2", показана на рис. 2.

Некоторая асимметрия графиков для высокоорбитальных космических аппаратов вызывается тем, что за время нахождения аппарата в области локации Земля совершает поворот вокруг своей оси на угол  $\Delta\varphi = \Omega(T_2 - T_1)/(2\pi)$ , где  $T_2$  — момент входа аппарата в область (3), а  $T_1$  — момент его выхода из этой области.

Поэтому графики не обладают осью симметрии относительно линии времени  $t = (T_2 - T_1)/2$ .

Скорость движения центров пятен при локации космических аппаратов не превышает 8 км/ч. График зависимости компонент скорости от времени приведен на рис. 3.

Имитационные эксперименты по локации космических аппаратов с подвижным приемным телескопом показали хорошие результаты.

Преимущества предложенного подхода к управлению подвижного телескопа лазерной станции заключаются в том, что система работает в режиме реального времени и не накапливает ошибок вычислений.

### Заключение

Проведенный анализ показал техническую реализуемость предлагаемого нового способа локации. При таком методе проведения локации космических аппаратов принимаемый поток энергии от отраженных импульсов значительно увеличивается. Максимальная скорость движения центров пятен отраженных световых импульсов по поверхности Земли не превышает 8 км/ч. Поэтому обеспечить движение подвижного телескопа за ними по поверхности Земли технически возможно. При таком способе локации ИСЗ потребуется изменение

приемной и передающей аппаратуры, системы регистрации и программного обеспечения. Как показал анализ, принципиально невыполнимых требований к технике и программному обеспечению не возникает.

В результате же область уверенного приема отраженных импульсов при лазерной локации высокоорбитальных ИСЗ значительно увеличится.

#### Список литературы

1. **Salvoldi M., Choukroun D.** AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. <<Intersatellite Laser Ranging and Attitude Robust Measurement Planning>>. San Diego, California, USA. 2016. <https://doi.org/10.2514/6.2016-2094>
2. **Ales F., Gath P. F., Johann U., Braxmaier C.** Modeling and Simulation of a Laser Ranging Interferometer Acquisition and Guidance Algorithm. // Journal of Spacecraft and Rockets. January 2014. Vol. 51, N. 1. P. 226–238. [<https://doi.org/10.2514/1.A32567>]
3. **Schumacher P. W., Gilbreath G. C., Davis M. A., Lydick E. D.** Precision of Satellite Laser Ranging Calibration of the Naval Space Surveillance System // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. September 2001. Vol. 24, N. 5. P. 925–932. URL: <https://doi.org/10.2514/2.4829>
4. **Buccino D. R., Seubert J. A., Asmar S. W., Park R. S.** Optical Ranging Measurement with a Lunar Orbiter: Limitations and Potential // Journal of Spacecraft and Rockets. May 2016. Vol. 53, N. 3. P. 457–463. URL: <https://doi.org/10.2514/1.A33415>
5. **Hough M. E.** Precise Orbit Determination Using Satellite Radar Ranging // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. July 2012. Vol. 35, N. 4. P. 1048–1058. URL: <https://doi.org/10.2514/1.56873>
6. **Денисов М. М.** Исследование погрешности определения углового положения космического аппарата при лазерной локации // Измерительная техника. 2009. № 11. С. 22–25.
7. **Денисов М. М.** Линейное отклонение отраженных лазерных импульсов при локации геостационарного ИСЗ // Электросвязь. 2010. № 10. С. 42–45.
8. **Денисов М. М.** Исследование линейной девиации при лазерной локации космических аппаратов на круговых орбитах // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 4. С. 29–37.
9. **Денисов М. М., Денисова И. П., Пасисниченко М. А.** Математическое моделирование движения отраженных импульсов по поверхности Земли при лазерной локации космических аппаратов, находящихся на круговых орбитах // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21, № 4. С. 3–10.
10. **Старовойтов Е. И., Савчук Д. В.** Программа "МИТРА" для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Труды МАИ. Электронный журнал. 2014. Вып. № 75. С. 1–17.
11. **Старовойтов Е. И., Зубов Н. Е.** Прикладные вопросы разработки бортовой лазерной локационной аппаратуры // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. № 9. С. 81–105.
12. **Старовойтов Е. И., Зубов Н. Е.** Анализ погрешностей и оптимизация приемного тракта бортовой лазерной локационной аппаратуры при измерении средних дальностей до космических объектов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 4. С. 115–128.
13. **Мурашкин В. В., Садовников М. А., Соколов А. Л., Шаргородский В. Д.** Исследование диаграммы направленности угловых отражателей с различным покрытием граней // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, № 3. С. 47–50.
14. **Останина М. В., Пасисниченко М. А., Ростовский В. С.** Математическое моделирование релятивистского эффекта при лазерной локации искусственных спутников Земли // Вестник Московского университета. Физика. Астрономия. 2013. № 6. С. 42–46.
15. **Ashby N., Bertotti B.** Relativistic effects in local inertial frames // Physical Review. 1986. Vol. 34, N. 8. P. 2246–2258.
16. **Денисов М. М.** Закон отражения лазерного импульса от ретрорефлектора, установленного на космическом аппарате // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 4. С. 33–39.
17. **Degnan J.** A Tutorial on Retroreflectors and Arrays for SLR // Presentation and paper from ILRS Technical Laser Workshop "Satellite, Lunar and Planetary Laser Ranging: Characterizing the Space Segment, INFN-LNF, Frascati, Italy, 2012. November 05–09.
18. **Дубошин Г. Н.** Небесная механика. М.: Наука, 1968. 800 с.
19. **Shatina A. V., Sherstnyov E. V.** Satellite motion in the gravitational field of a viscoelastic planet with a core // Cosmic Research. 2015. Vol. 53, N. 2. P. 163–170.
20. **Денисов М. М.** Математическое моделирование релятивистских поправок при лазерной локации космических аппаратов // Математическое моделирование. 2008. Т. 20, N. 6. С. 57–66.
21. **Denisov V. I., Denisov M. M.** Mathematical Modeling of Angular Distortions in Laser Ranging of the Radio Astron Satellite // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2008. Vol. 48, iss. 8. P. 1418–1427.
22. **International Laser Ranging Service** A service of the International Association of Geodesy. URL: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>

**I. P. Denisova**, D. Sc., Professor, e-mail: [kaf.pmitet.mai@yandex.ru](mailto:kaf.pmitet.mai@yandex.ru),  
**Yu. A. Kostikov**, Ph. D., Professor, e-mail: [kaf.pmitet.mai@yandex.ru](mailto:kaf.pmitet.mai@yandex.ru),  
**M. V. Lebedeva**, Senior Lecturer, e-mail: [kaf.pmitet.mai@yandex.ru](mailto:kaf.pmitet.mai@yandex.ru),  
**M. A. Pasisnichenko**, Assistant, e-mail: [kaf.pmitet.mai@yandex.ru](mailto:kaf.pmitet.mai@yandex.ru)  
Moscow Aviation Institute (National Research University),

## Mathematical, Algorithmic and Software Support for a Spacecraft Laser-Ranging System Using a Movable Telescope

*A mathematical model of the laser-ranging of the circular orbiting spacecraft was developed using a laser station located on the surface of the rotating Earth. This model is based on the equations of motion of light pulses in a non-inertial rotating reference frame, deriving from the equations of Einstein's Theory of General Relativity.*

Numerical calculations and laser ranging practice have shown that the centers of the spots formed by the reflected from the spacecraft retroreflector light pulses, move across the Earth surface. During a single location's session, their distance from the laser station varies from several hundred meters to a dozen meters. Therefore, the receiving telescope of the laser station is located on the periphery of the spot.

The intensity of the reflected light pulse decreases in its cross-section with the distance from the center to the periphery. Therefore, only a small part of the flow of the light energy of the reflected pulse reaches the receiving telescope. The speed of the spots' centers movement on the Earth surface is not more than ten miles per hour.

In the paper a new method of carrying out laser ranging was proposed, when the receiving telescope separated from the laser station by a special device follows the centers of the spots formed by the light pulses reflected from the spacecraft.

The aim of this work is the development of an algorithm and software that are essential for the new method of carrying out spacecraft laser ranging. A set of programs designed to implement the method is described. A computational experiment aimed at the study of evaluation of effectiveness of the proposed method on high-orbital as well as low-orbital spacecrafts ranging was accomplished. This experiment has shown good results. Therefore, this new laser ranging approach can be recommended as a possible basis for creation of the next generation intelligent laser stations.

**Keywords:** mathematical model of laser location, a retroreflector, an algorithm, a database, The GLONASS System, the decision-making

DOI: 10.17587/it.24.573-581

### References

1. **Salvoldi M., Choukroun D.** AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Intersatellite Laser Ranging and Attitude Robust Measurement Planning, San Diego, California, USA, 2016. [https://doi.org/10.2514/6.2016-2094]
2. **Ales F., Gath P. F., Johann U., Braxmaier C.** Modeling and Simulation of a Laser Ranging Interferometer Acquisition and Guidance Algorithm, *Journal of Spacecraft and Rockets*, January 2014, vol. 51, no. 1, pp. 226–238, URL: https://doi.org/10.2514/1.A32567
3. **Schumacher P. W., Gilbreath G. C., Davis M. A., Lydick E. D.** Precision of Satellite Laser Ranging Calibration of the Naval Space Surveillance System, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, September 2001, vol. 24, no. 5, pp. 925–932. URL: https://doi.org/10.2514/2.4829
4. **Buccino D. R., Seubert J. A., Asmar S. W., Park R. S.** Optical Ranging Measurement with a Lunar Orbiter: Limitations and Potential, *Journal of Spacecraft and Rockets*, May 2016, vol. 53, no. 3, pp. 457–463, URL: https://doi.org/10.2514/1.A33415
5. **Hough M. E.** Precise Orbit Determination Using Satellite Radar Ranging, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, July 2012, vol. 35, no. 4, pp. 1048–1058, URL: https://doi.org/10.2514/1.56873
6. **Denisov M. M.** Issledovanie pogreshnosti opredelenija uglovogo polozhenija kosmicheskogo apparata pri lazernoj lokacii, *Izmeritel'naja tehnika*, 2009, no. 11, pp. 22–25 (in Russian).
7. **Denisov M. M.** Linejnoe otklonenie otrazhennyh lazernyh impul'sov pri lokacii geostacionarnogo ISZ, *Jelektrosvjaz'*, 2010, no. 10, pp. 42–45 (in Russian).
8. **Denisov M. M.** Issledovanie linejnoj deviacii pri lazernoj lokacii kosmicheskikh apparatov na krugovyh orbitah, *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 29–37 (in Russian).
9. **Denisov M. M., Denisova I. P., Pasisnichenko M. A.** Matematicheskoe modelirovanie dvizhenija otrazhennyh impul'sov po poverhnosti Zemli pri lazernoj lokacii kosmicheskikh apparatov, nahodjashhhsja na krugovyh orbitah, *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 3–10 (in Russian).
10. **Starovojtov E. I., Savchuk D. V.** Programma "MITRA" dlja modelirovanija harakteristik bortovyh lazernyh lokacionnyh sistem kosmicheskikh apparatov, *Trudy MAI, Jelektronnyj zhurnal*, 2014, is. 75, pp. 1–17 (in Russian).
11. **Starovojtov E. I., Zubov N. E.** Prikladnye voprosy razrabotki bortovoj lazernoj lokacionnoj apparatury, *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. Je. Baumana. Jelektron. zhurn.*, 2015, no. 9, pp. 81–105 (in Russian).
12. **Starovojtov E. I., Zubov N. E.** Analiz pogreshnostej i optimizacija priemnogo trakta bortovoj lazernoj lokacionnoj apparatury pri izmerenii srednih dal'nostej do kosmicheskikh ob#ektov, *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2016, no. 4, pp. 115–128 (in Russian).
13. **Murashkin V. V., Sadovnikov M. A., Sokolov A. L., Sharгородskij V. D.** Issledovanie diagrammy napravlenosti ugolkovyh otrazhatelej s razlichnym pokrytiem granej, *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*, 2011, vol. 16, no. 3, pp. 47–50 (in Russian).
14. **Ostanina M. V., Pasisnichenko M. A., Rostovskij V. S.** Matematicheskoe modelirovanie reljativistskogo jeffekta pri lazernoj lokacii iskusstvennyh sputnikov Zemli, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Fizika. Astronomija*, 2013, no. 6, pp. 42–46 (in Russian).
15. **Ashby N., Bertotti B.** Relativistic effects in local inertial frames, *Physical Review*, 1986, vol. 34, no. 8, pp. 2246–2258.
16. **Denisov M. M.** Zakon otrazhenija lazernogo impul'sa ot retroreflektora, ustanovlennogo na kosmicheskom apparate, *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 33–39 (in Russian).
17. **Degnan J.** A Tutorial on Retroreflectors and Arrays for SLR, Presentation and paper from ILRS Technical Laser Workshop "Satellite, Lunar and Planetary Laser Ranging: Characterizing the Space Segment", INFN-LNF, Frascati, Italy, November 05–09, 2012.
18. **Duboshin G. N.** *Nebesnaja mehanika*. Moscow, 1968. 800 p. (in Russian).
19. **Shatina A. V., Sherstnyov E. V.** Satellite motion in the gravitational field of a viscoelastic planet with a core, *Cosmic Research*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 163–170.
20. **Denisov M. M.** Matematicheskoe modelirovanie reljativistskikh popravok pri lazernoj lokacii kosmicheskikh apparatov, *Matematicheskoe modelirovanie*, 2008, vol. 20, no. 6, pp. 57–66.
21. **Denisov V. I., Denisov M. M.** Mathematical Modeling of Angular Distortions in Laser Ranging of the RadioAstron Satellite, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2008, vol. 48, iss. 8, pp. 1418–1427.
22. **International Laser Ranging Service** A service of the International Association of Geodesy, available at: http://ilrs.gsfc.nasa.gov

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER GRAPHICS AND GEOMETRIC MODELING

УДК 004.921

DOI: 10.17587/it.24.582-585

**А. Д. Филинских**, канд. техн. наук, доц., e-mail: alexfil@yandex.ru,  
**К. С. Корсаков**, магистрант, e-mail: korsakov-kirill@mail.ru,  
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

## Интерактивная трехмерная модель Нижегородского Кремля

*Описана методика создания интерактивных трехмерных моделей на базе технологии WebGL, которая позволяет просматривать и управлять моделью в совместимых web-браузерах без сторонних плагинов. Создана сцена, описан способ добавления трехмерных моделей на сцену, добавления текстур моделям. Проведена работа с тенями для создания более реалистичной картины. Предлагается способ контроля камеры для оптимального просмотра модели. Предложены структура, процедура и функции для реализации проекта.*

**Ключевые слова:** трехмерная модель, WebGL, three.js, javascript, HTML, интерактивная трехмерная графика, Нижегородский Кремль

### Введение

Нижний Новгород — это город с богатой историей и большим культурным наследием. В городе имеется большое число памятников, исторических строений и красивых парков. На сегодняшний день демонстрация вышеперечисленных достопримечательностей реализуется за счет фото- и видеосъемки объектов и распространения информации посредством сети Интернет на различных ресурсах. Данный способ демонстрации не дает достаточной информации об объекте. Возникает задача повышения привлекательности города для туристов за счет разработки нового способа демонстрации достопримечательностей города с помощью технологии WebGL.

В данной работе описан процесс создания визуализации 3D-модели Нижегородского кремля с использованием технологии WebGL и библиотеки three.js.

**WebGL** [1] — это технология, базирующаяся на технологии OpenGL ES 2.0 и предназначенная для создания, а также отображения интерактивной двухмерной и трехмерной графики в веб-браузерах. Главной особенностью данной технологии является то, что для работы с ней не нужно устанавливать никаких сторонних плагинов или библиотек. Работа веб-приложений с использованием технологии WebGL основа-

на на коде JavaScript, а некоторые элементы кода, так называемые шейдеры [2], могут выполняться непосредственно на графических процессорах [3], что значительно увеличивает производительность веб-приложений. Таким образом, для создания приложений разработчики могут использовать стандартные для веб-среды технологии HTML/CSS/JavaScript и при этом также применять аппаратное ускорение графики. Стоит отметить, что данная технология не привязана к какой-либо платформе и является кроссбраузерной. Также данная технология работает и на мобильных устройствах.

Перед написанием программного кода нужно подготовить трехмерную модель. В целом ее можно было бы выполнить и средствами WebGL, но данный способ нерационален, так как является достаточно трудоемким и требует большого количества времени. Наиболее просто и быстро это можно сделать, воспользовавшись трехмерным графическим редактором, например 3ds Max, Blender или ZBrush.

### Основная часть

Интерактивная модель — это модель, с которой можно взаимодействовать, т. е. наблюдать ее реакцию и поведение при различных внешних воздействиях.

Интерактивная модель графического объекта должна обеспечивать:

- возможность изменения освещения, позволяющую рассмотреть модель со всех сторон;
- возможность управления положением модели в пространстве с помощью мыши для детального рассмотрения модели с разных сторон;
- возможность приближения и отдаления камеры;
- наличие текстур на моделях;
- размещение на хостинге для проверки работоспособности и наглядной демонстрации.

Воспользуемся созданной на кафедре "Графические информационные системы" НГТУ им. П. Е. Алексеева трехмерной моделью Нижегородского кремля и окружающего его рельефа, созданного на основе топографических карт в программе 3ds Max компании Autodesk.

Процесс построения интерактивной модели в технологии WebGL с помощью библиотеки `three.js` начинаем с создания основных элементов:

- 1) `scene` — место, где происходит визуализация [4];
- 2) `camera` — камера;
- 3) `render` — функция, отвечающая за визуализацию;
- 4) `controls` — применение контроля к камере;
- 5) `light` — источник света.

Создадим четыре направленных источника света типа `THREE.DirectionalLight` с разных сторон для того, чтобы модели были хорошо освещены со всех сторон.

После того, как основные элементы добавлены, начинаем работу непосредственно с моделями.

### Добавление модели

В технологии WebGL двумя наиболее популярными загрузчиками являются `OBJLoader.js` и `OBJMTLLoader.js`. В ходе анализа загрузчика `OBJMTLLoader.js` было выявлено, что данный загрузчик добавляет модель целиком, а не отдельно каждую деталь, но возникли проблемы с отображением текстур, поэтому для работы был выбран загрузчик `OBJLoader.js`, так как он позволяет добавлять объекты на сцену по отдельности, а не целиком модель, тем самым увеличивая трудоемкость работы, но позволяя более тщательно настраивать их текстуры с помощью экземпляра `THREE.Texture`.

Так как модель может состоять и из одного, и из множества подобъектов, необходимо каждый подобъект модели, который состоит из геометрии и из первоначальной текстуры, сохранить в отдельную переменную (`Mesh`). Для этого создаем массив.

На примере модели ландшафта создаем загрузчик `objLoader`, в который подгружаем модель и прописываем функцию `console.log(object)`, позволяющую следить за процессом загрузки модели.

Далее прописываем функцию, которая пройдет по всем дочерним объектам и проверит типы данных. Если тип данных правильный, то он будет добавлен в созданный ранее массив:

```
object.traverse(function (child) {
    if (child instanceof THREE.Mesh)
        { meshes.push(child); });
```

Модель ландшафта состоит из одного дочернего элемента, поэтому создаем переменную и присваиваем ей единственный дочерний элемент, далее с помощью команды `scene.add(name)` добавляем переменную на сцену, заранее присвоив ей стандартный материал с помощью экземпляра стандартного материала `THREE.MeshNormalMaterial` (рис. 1, см. третью сторону обложки).

### Добавление текстуры

Для того чтобы добавить текстуру на загруженную ранее модель, создаем менеджер загрузок (переменная — `manager`) с помощью экземпляра `THREE.LoadingManager`, после этого создаем загрузчик изображения (переменная — `loader`) с использованием экземпляра `THREE.ImageLoader` и передаем в него значение переменной `manager`. Создаем загрузчик текстур `THREE.Texture`, в который подгружаем сами текстуры и прописываем их параметры. Следует отметить, что для каждой текстуры необходимо создавать свой загрузчик текстур.

Присваиваем загруженную текстуру переменной дочернего элемента модели ландшафта с помощью экземпляра блестящего материала `THREE.MeshPhongMaterial` (рис. 2).

Блестящий материал был выбран, так как он является достаточно гибким для настройки и текстуры выглядят более реалистичными.

Процесс загрузки модели в технологии WebGL с помощью загрузчика моделей `OBJLoader` устроен так, что после загрузки объ-

екта нужно пройти по каждому потомку, добавить его в массив, далее добавить его на сцену и после этого задать каждому потомку определенную текстуру. Так как дочерних элементов может быть несколько сотен, то добавления каждого из них — это достаточно трудоемкий и нерациональный процесс. Необходимо провести оптимизацию модели в программе 3ds Max, которая заключалась в объединении частей модели с одинаковыми текстурами в единое целое. Модель Архангельского собора до оптимизации состояла из 750 объектов, после оптимизации число дочерних элементов сократилось до 12 (рис. 3, а, б, см. третью сторону обложки).

Число строк кода неоптимизированной модели составляло 3800, после оптимизации число строчек кода сократилось до 54.

После оптимизации всех моделей переходим к загрузке и добавлению их на сцену описанным на примере ландшафта способом (рис. 4). Так как модели, сделанные в программе 3ds

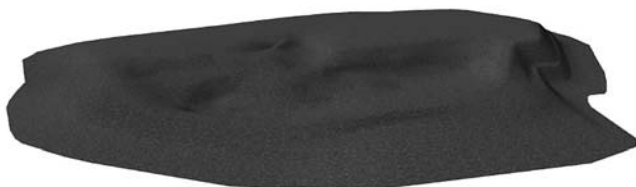


Рис. 2. Ландшафт с наложенной текстурой

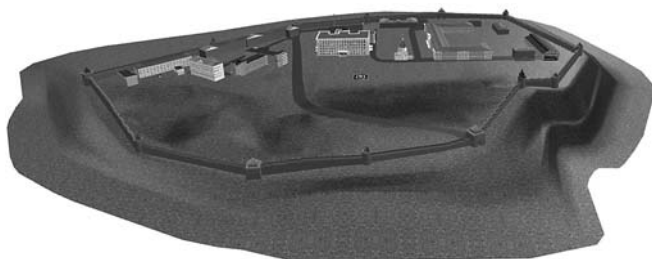


Рис. 4. Интерактивная модель Нижегородского Кремля

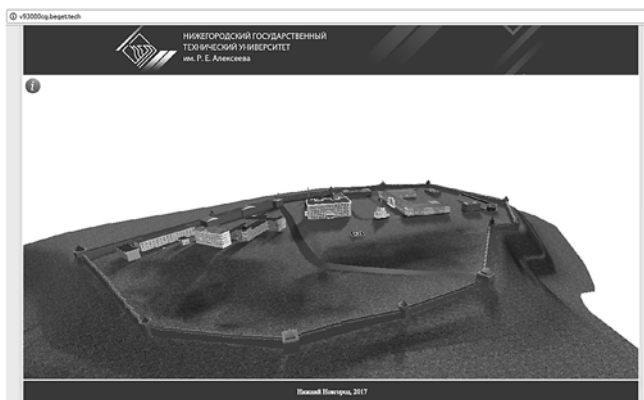


Рис. 6. Интерактивная модель Нижегородского Кремля на сайте

Max, при конвертации в формат.obj сохраняют координаты своего положения, то при добавлении их на сцену средствами WebGL они будут расположены на тех же местах, что и в трехмерной модели в 3ds Max.

## Добавление теней

Для придания реалистичности сцене библиотека three.js позволяет добавлять тень объектам.

Для того чтобы модели могли отбрасывать и принимать тень, необходимо в параметрах рендеринга параметру *shadowMap.enabled* и *shadowMap.soft* присвоить значение *true*.

С помощью параметров *castShadow* и *receiveShadow* каждому элементу на сцене добавляется возможность отбрасывать и принимать тень, для этого устанавливается значение *true* для этих параметров.

Следующим шагом является создание дополнительного источника света, благодаря которому объекты будут отбрасывать тень. Тень должна падать только в одну сторону, от одного источника света, поэтому добавляем пятый направленный источник света типа **THREE.DirectionalLight**, располагаемый дальше и выше остальных источников света. С помощью параметров *shadowDarkness*, *shadow.mapSize.width*, *shadow.mapSize.height*, *shadow.camera.near*, *shadow.camera.far*, *shadow.camera.left*, *shadow.camera.bottom*, *shadow.camera.right*, *shadow.camera.top* настраиваем интенсивность теней, их качество и расстояние, на которое светит новый источник света.

После настройки теней сцена принимает вид, показанный на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

Данная модель была выложена на сайт [5] (рис. 6).

## Заключение

В результате работы рассмотрен процесс визуализации трехмерной модели Нижегородского Кремля с последующей публикацией в сети Интернет. Полученный результат был проанализирован в пяти самых популярных браузерах.

При открытии модели были выявлены следующие моменты:

1) геометрия моделей отображается без изменений;



2) имеется незначительное изменение в отображении текстур в двух браузерах;

3) основной функционал работает исправно (управление мышью, масштабирование).

Основываясь на полученном результате, можно сделать вывод о возможности использовать данную технологию для визуализации других трехмерных моделей различных достопримечательностей Нижнего Новгорода.

#### Список литературы

1. **WebGL**-технология. URL: <https://metanit.com/web/webgl/1.1.php> (Дата обращения 12.12.2016).
2. **Шейдеры**. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%D1%80%D0%B5%D0%B9%D0%B4%D0%B5%D1%80> (дата обращения 9.10.2017).
3. **Графический** процессор. URL: <http://we-it.net/index.php/zhelezo/videokarty/159-taktovaya-chastota-graficheskogo-protssora-videokarty> (дата обращения 6.10.2017).
4. **Визуализация**. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/840376> (дата обращения 6.10.2017).
5. **Рабочая** модель. URL: <http://v93080cg.beget.tech/>

**A. D. Filinskih**, Ph. D., Associate Professor, e-mail: alexfil@yandex.ru,

**K. S. Korsakov**, Magistrant, e-mail: korsakov-kirill@mail.ru,

Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

## Interactive Three-Dimensional Model of the Nizhny Novgorod Kremlin

*The method is described for creating interactive three-dimensional models based on WebGL technology which allows to view and manipulate the model in compatible web browsers without other plug-ins. A scene is created, a method describes how to add three-dimensional models to the scene, add textures to models. Work has been done with shadows to create a more realistic picture. We propose a method of camera control, for optimal viewing of the model. The structure, procedure and functions for the project implementation are proposed.*

**Keywords:** *three-dimensional model, WebGL, three.js, javascript, HTML, interactive three-dimensional graphics, Nizhny Novgorod Kremlin*

DOI: 10.17587/it.24.582-585

#### References

1. **WebGL**-tehnologija, available at: <https://metanit.com/web/webgl/1.1.php> (date of access 12.12.2016).
2. **Shejdery**, available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%D1%80%D0%B5%D0%B9%D0%B4%D0%B5%D1%80> (date of access 9.10.2017) (in Russian).

3. **Graficheskij** processor, available at: <http://we-it.net/index.php/zhelezo/videokarty/159-taktovaya-chastota-graficheskogo-protssora-videokarty> (date of access 6.10.2017) (in Russian).
4. **Vizualizacija**, available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/840376> (date of access 6.10.2017) (in Russian).
5. **Rabochaja** model', available at: <http://v93080cg.beget.tech/> (in Russian).

**А. В. Чернышов**, канд. техн. наук, доц. кафедры ИУ-6 МФ, sch@mgul.ac.ru  
Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Российская Федерация

## Исследование свойств долговременных электронных архивных хранилищ информации на оптических дисках, организованных в структуры RAID-5

*Рассмотрена проблема создания локальных архивных хранилищ электронной информации для небольших организаций. Наряду с надежностью хранения информации большое внимание уделено минимизации стоимости создания и владения архивным хранилищем. Для достижения цели предложено использовать оптические диски однократной записи, объединенные в массивы RAID-5. Показано, что в большинстве случаев наилучшие результаты достигаются при использовании структур RAID-5 с самостоятельными запасными копиями каждого диска в каждом массиве RAID-5. Но при минимальном размере архива (порядка 1 Тбайт) более выгодным может оказаться использование одиночных дисков с тремя копиями. Показано, что возможно увеличение числа дисков в массивах RAID-5 для сокращения удельной стоимости хранения информации при соответствующем уменьшении надежности хранения информации.*

**Ключевые слова:** электронное архивное хранилище информации, длительное хранение, оптические носители информации, надежность хранения информации, минимизация затрат

### Введение

В мире существует большое число небольших организаций, которым по тем или иным причинам необходимо локальное файловое хранилище. Например, в России одних только школьных музеев (число сотрудников часто менее 5) на 2010 г. существовало более 11 000 [1]. Объемы фондов таких музеев при оцифровке, как правило, не превышают 10 Тбайт, но в некоторых случаях могут достигать нескольких десятков терабайт. Обычно такие организации не могут использовать дорогостоящее профессиональное оборудование для создания локального файлового хранилища. Использование же для этих целей облачных сервисов нежелательно по целому ряду причин [2].

Между тем сегодня появилась возможность создания архивных файловых хранилищ довольно больших объемов из недорогих компьютерных комплектующих, которые можно приобрести в обычном компьютерном магазине.

Современный стандарт архивного хранения информации [3] требует использовать носители информации однократной записи, т. е. оптиче-

ские диски однократной записи (CD-R, DVD-R, BD-R). Для записи или воспроизведения каждого такого диска требуется специальный привод. На рынке представлены роботизированные библиотеки оптических дисков [4, 5]. Но цена этих устройств [6, 7] не позволяет небольшим организациям применять их для создания своих локальных файловых архивных хранилищ. Однако при работе с дисками "вручную" ничто не мешает созданию архивного файлового хранилища на оптических дисках с минимальными затратами средств. Необходимы лишь привод оптических дисков, жесткий диск большой емкости (обычно являются частью самого компьютера), сами оптические диски однократной записи и место для их хранения.

По разным причинам оптические диски время от времени все же выходят из строя [8, 9]. Причем предсказать априори вероятность отказа оптических дисков из конкретной партии практически невозможно. Поэтому при размещении в архивном файловоом хранилище очередного оптического диска сразу необходимо изготовление нескольких его копий, также помещаемых на архивное хранение.

Снизить стоимость хранения данных можно за счет объединения оптических дисков в отказоустойчивые массивы RAID, наиболее дешевым из которых оказывается RAID-5. Некоторые современные библиотеки оптических дисков предлагают такую возможность в качестве одного из режимов работы [4, 6].

С практической точки зрения представляет интерес определение оптимального числа дисков в группе, организованной в RAID-5, а также числа копий дисков, при которых заданный уровень надежности хранения информации заданного объема будет достигнут с минимальной стоимостью при априори неизвестной надежности применяемых оптических дисков.

Практически все опубликованные ранее исследования (в частности, [10–12]) рассматривают массивы RAID большого объема, построенные на жестких дисках (вероятность отказа одного диска, как правило,  $10^{-15}$  и менее) и без учета стоимости решения.

В данной работе рассматривается вопрос надежности архивов относительно небольшого объема, построенных на дисках однократной записи (вероятность отказа одного диска в общем случае непредсказуема и может принимать значения вплоть до  $10^{-1}$ , а в отдельных случаях еще хуже) с требованием минимизации стоимости хранения информации.

### Постановка задачи

Пусть необходимо создать долговременное электронное хранилище информации (файловый архив) на оптических дисках однократной записи для небольшой организации. Необходимо минимизировать затраты на создание и сопровождение файлового архива, но при этом обеспечить заданное значение надежности хранения информации при априори неизвестной вероятности отказа оптических дисков, применяемых для хранения информации, путем создания нескольких копий каждого диска.

Прогнозируемый максимальный объем сохраняемой в архиве информации задается при проектировании структуры архива и может лежать в пределах от единиц до десятков терабайт.

### Модели надежности хранения информации в архиве из оптических дисков

Построение и исследование модели надежности хранения информации в архиве из неза-

висимых оптических дисков было выполнено в работе [13]. Обозначим для краткости этот тип хранилища как R1. Согласно полученной модели вероятность  $Q_n$  потерять хотя бы часть информации составит

$$Q_n = 1 - (1 - q^n)^l.$$

Стоимость такого решения составит

$$C_n = c \cdot l \cdot n + C_{\text{п}},$$

где  $l = [W/V]$  — число оптических дисков, необходимых для сохранения информации объема  $W$  на дисках объемом  $V$ ;  $[\cdot]$  — операция округления до большего целого;  $q$  — вероятность выхода из строя одного оптического диска в течение периода между контролями исправности;  $n$  — число запасных копий каждого диска;  $c$  — стоимость одного оптического диска;  $C_{\text{п}}$  — стоимость одного привода оптических дисков.

Из выкладок [12] для структур RAID-5 вероятность потери хотя бы части информации при отсутствии запасных копий:

— для одного массива RAID-5

$$Q_{\text{RAID5}} = 1 - (1 - q)^k(1 + kq);$$

— для всего объема сохраняемой информации

$$Q_5 = 1 - ((1 - q)^k(1 + kq))^L,$$

где  $k$  — число дисков в одном массиве RAID-5 без учета избыточного диска ( $k > 2$ );  $L$  — число массивов RAID-5, необходимое для сохранения всей информации объема  $W$ .

Для увеличения надежности сохранения информации в архиве необходимо создание запасных (резервных) копий архивных дисков. Для структур RAID-5 возможно два варианта создания таких копий:

1) каждая группа RAID-5 из  $k^*$  дисков ( $k^* = k + 1$ ) рассматривается и используется как неделимое целое; создаются  $n$  копий каждой группы RAID-5 (рис. 1); обозначим этот вариант как R5;

2) создаются  $n$  копий каждого отдельного диска в архиве (можно условно считать, что эти копии образуют структуру RAID-1, хотя в действительности диски записывают и используют поочередно); для считывания информации массив RAID-5 может быть создан из любых копий каждого из  $k^*$  дисков группы (условно можно рассматривать получившуюся структуру как RAID-15) (рис. 2); обозначим этот вариант как R15.

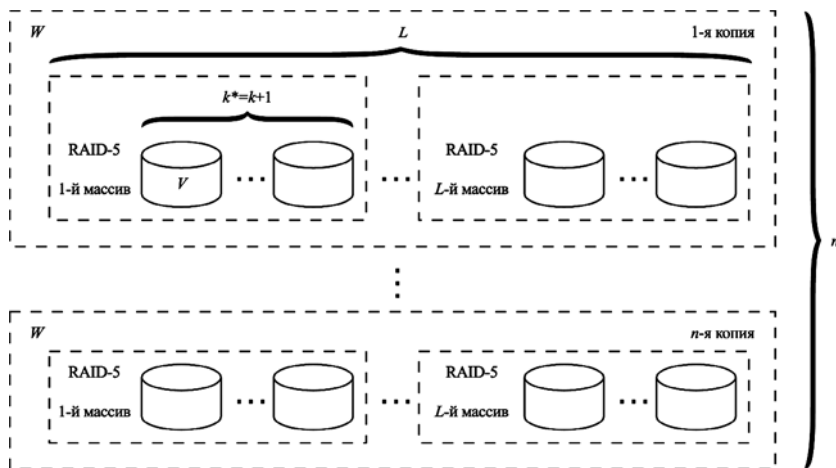


Рис. 1. Структура электронного файлового архива с дисками, организованными в структуры RAID-5, при создании запасных копий RAID-5 (структура R5):  $W$  — общий объем данных, сохраняемый в архиве;  $V$  — емкость одного оптического диска

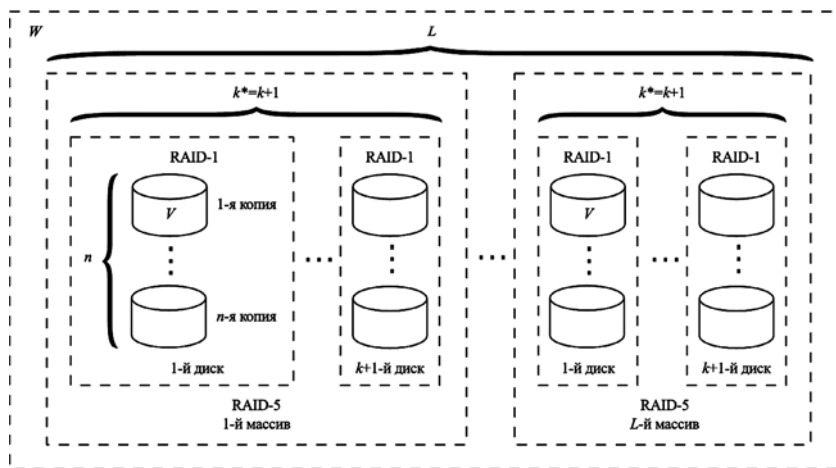


Рис. 2. Структура электронного файлового архива с дисками, организованными в структуры RAID-5, с запасными копиями каждого диска (структура R15)

В работе [12] исследована надежность этих структур дисковых массивов, но только для  $n = 2$  и только для жестких дисков. Рассмотрим эти структуры с учетом специфики дисковых массивов, построенных из однократно записываемых оптических дисков.

Вариант R5 [12] обеспечивает меньшую надежность сохранения информации. Однако для роботизированных библиотек, работающих с оптическими дисками, объединенными в картриджи [4], технически возможным оказывается только он. Вариант же R15 возможен либо при полностью "ручной" сборке RAID-5, либо на оптических библиотеках, не использующих картриджи, и только если в такой библиотеке имеется не менее трех приводов оптических дисков. Например, в работе [14] описана роботизированная библиотека, которая может иметь до 64 одновременно работающих приводов.

Для варианта R5: вероятность потери информации на одном массиве RAID-5 при  $n$  копиях равна  $(Q_{\text{RAID5}})^n$ , вероятность сохранения информации на  $n$  копиях массива RAID-5 равна  $1 - (Q_{\text{RAID5}})^n$ , вероятность сохранения полного объема информации  $W$  на  $L$  массивах RAID-5 с  $n$  копиями равна  $(1 - (Q_{\text{RAID5}})^n)^L$ , а вероятность потери хотя бы части информации в таком архиве равна

$$Q_{5n} = 1 - (1 - (Q_{\text{RAID5}})^n)^L = 1 - (1 - (1 - (1 - q)^k(1 + kq)))^n)^L.$$

Для варианта R15: можно считать, что каждый массив RAID-5 образован дисковыми массивами RAID-1 по  $n$  дисков в каждом, вероятность потери информации на каждом из которых равна  $q^n$ .

Используя выведенную ранее формулу вероятности потери хотя бы части информации для  $L$  массивов RAID-5 (параметр  $Q_5$ ), получим формулу вероятности потери хотя бы части информации для  $L$  структур типа R15 (заменяв значение  $q$  вероятности отказа одного диска на значение  $q^n$  вероятности отказа массива RAID-1):

$$Q_{15} = 1 - ((1 - q^n)^k(1 + kq^n))^L.$$

Стоимость обоих вариантов архива будет одинакова и составит

$$C_{5n} = C_{15} = ncl^* + C_{\text{п}}k^*,$$

где  $l^* = Lk^*$  — общее число дисков для сохранения одной копии информации объемом  $W$ . В формуле учтено, что для работы с массивами RAID-5 потребуется одновременное использование  $k^*$  приводов оптических дисков.

### Исследование построенных моделей

Для файловых архивов небольших организаций имеет смысл рассмотреть построенные модели для значений  $W$ , равных 1, 10 и 90 Тбайт. Последнее значение близко к емкости промышленной библиотеки оптических дисков Panasonic LB-DH8 [4] в базовой комплектации, имея

Таблица 1

Тип диска	Емкость диска $V$ , Гбайт	Абсолютная цена $c$ , руб.		Удельная цена $c/V$ , руб./Гбайт	
		Минимальная	Максимальная	Минимальная	Максимальная
CD-R	0,7	20	67	28,57	95,71
DVD-R	4,7	21	106	4,47	22,55
BD-R	25	65	140	2,6	5,6
BD-R DL	50	160	510	3,2	10,2
BD-R XL	100	1100	3606	11	36,06

в виду, что для электронных архивов небольших организаций объем данных, сохраняемых в архиве, обычно меньше этого значения.

В качестве оптического диска в данной работе будет рассматриваться только носитель типа BD-R емкостью 25 Гбайт ( $V = 25$ ). Этот выбор обусловлен необходимостью минимизации затрат на закупку дисков и отвечает реалиям рынка оптических носителей в России. Как следует из табл. 1, построенной по данным [15–17], диски BD-R и для минимальной, и для максимальной цены на рынке обладают наименьшей удельной стоимостью на единицу сохраняемой информации.

Поскольку при создании архива вероятность отказа используемых оптических дисков априори неизвестна, будем при исследовании моделей использовать "заведомо плохое" значение  $q = 0,1$  (то есть отказывает каждый десятый диск). Это значение  $q$  следует, в частности, из работы [8]. Будем считать, что результаты данного исследования покажут "заведомо наихудший" случай; реальная картина сохраняемости информации в архиве должна быть лучше.

Построим графики зависимости  $Q(q)$  для различных значений  $W$  и для разного числа копий информации  $n$  (рис. 3).

Графики для структур R5 и R15 построены для  $k = 2$ , обеспечивающем минимальное (наилучшее) значение параметра  $Q$ .

Условимся считать, что  $Q$  создаваемого архива должно быть по крайней мере не хуже  $q$  оптических дисков, которые его составляют, т. е.  $Q < q$ . Это условие выполняется для графиков, оказавшихся под штриховой линией, соответствующей функции  $Q(q) = q$ . Оно никогда не выполнится для архива R1 при  $n = 1$  (без копий) [13], поэтому эти графики на рис. 3 не показаны и далее при анализе не рассматриваются.

На рис. 3 можно видеть, что:

- для  $W = 1$  Тбайт условие  $Q < q$  выполняется при  $n > 2$  для архива R1 и при  $n > 1$  для архивов R5, R15 уже при  $q = 0,1$ , а с уменьшением  $q$  до  $\sim 10^{-2}$  становится выполнимым для любых структур;

- для  $W = 10$  Тбайт это условие при  $q = 0,1$  выполняется при  $n > 3$  для архива R1 и при  $n > 2$  для архивов R5, R15 (для R15 оно выполняется и для  $n = 2$ ); для любых структур оно начинает выполняться при уменьшении значения  $q$  до  $\sim 10^{-3}$ ;

- для  $W = 90$  Тбайт это условие при  $q = 0,1$  выполняется при  $n > 2$  для R5, R15 и при  $n > 4$  для R1; согласно выполненным расчетам, для любых структур оно начинает выполняться при уменьшении значения  $q$  до  $\sim 10^{-4}$ ;

- для любого из рассмотренных значений  $W$  можно говорить о сопоставимости значений  $Q$  и их характера изменения при изменении  $q$ :

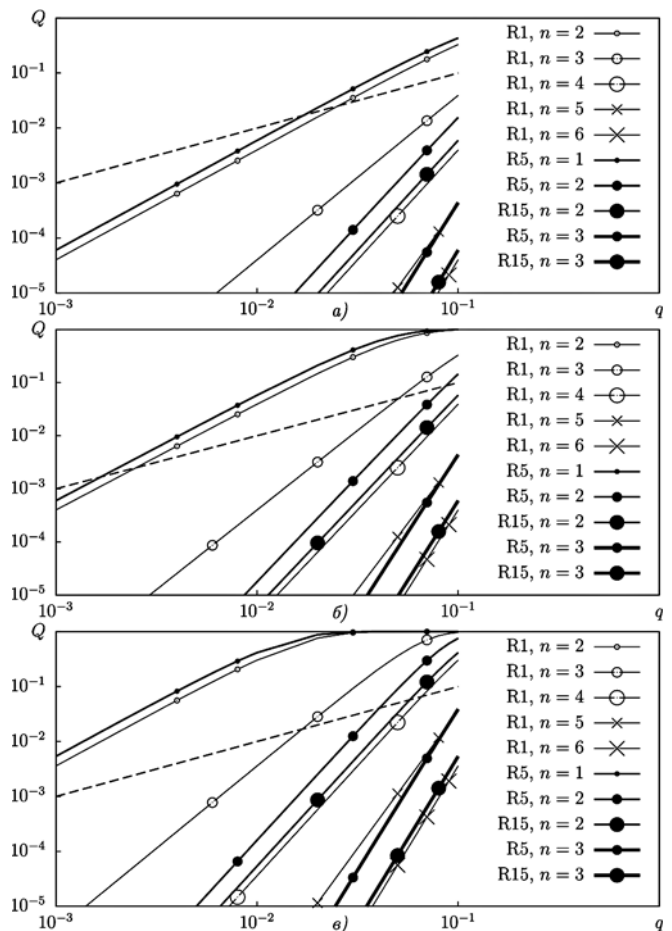


Рис. 3. Характер изменения вероятности потери информации  $Q$  при изменении вероятности отказа одного диска  $q$  в районе  $q = 0,1$  при  $k = 2$ :

$a$  — для  $W = 1$  Тбайт;  $b$  — для  $W = 10$  Тбайт;  $v$  — для  $W = 90$  Тбайт

— для R1 с  $n = 2$  и R5 с  $n = 1$ ;  
 — для R1 с  $n = 4$  и R5, R15 с  $n = 2$ . В последнем случае структура R1 с точки зрения значения параметра  $Q$  имеет заметное на графике преимущество перед R5 и незначительное перед R15, но по числу оптических дисков R1 проигрывает R5 и R15, а структура R1 с  $n = 3$  имеет одинаковое со структурами R5, R15 число дисков, но проигрывает им в значении параметра  $Q$ , что особенно заметно при уменьшении значения параметра  $q$ .

Анализируя графики на рис. 3, построим сводную рекомендательную таблицу выбора значений  $n$  для различных структур архива, организованного на оптических дисках DB-R ( $V = 25$  Гбайт), чтобы выполнялся сформулированный выше минимальный критерий  $Q < q$  для выбранного нами "наихудшего" значения  $q = 0,1$  (табл. 2).

Анализируя табл. 2, необходимо помнить, что в каждой строке  $Q(R1, n_{\text{табл}}) \gg Q(R15, n_{\text{табл}})$ , но при этом  $Q(R15, n_{\text{табл}})$  довольно близко к  $Q(R1, n_{\text{табл}} + 1)$ , хотя и не достигает его. В табл. 3 выполнен расчет числа оптических дисков, необходимых для создания архива в соответствии с числом копий, приведенным в табл. 2.

По табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что если пренебречь стоимостью двух дополнительных оптических приводов (при  $k = 2$ ), то с учетом более низкого (лучшего) значения  $Q$  уже при  $W = 1$  Тбайт наилучшим (наиболее надежным и наименее затратным) решением будет создание архива на структурах R15 при  $n = 2$ .

Архив на базе структур R5 по надежности проигрывает R15, а при  $W = 10$  Тбайт он

Таблица 2

W, Тбайт	Значение n для структур архива:		
	R1	R5 (k = 2)	R15 (k = 2)
1	3	2	2
10	4	3	2
90	5	3	3

Таблица 3

W, Тбайт	Суммарное число оптических дисков			
	R1 (n <sub>табл</sub> )	R5 (k = 2, n <sub>табл</sub> )	R15 (k = 2, n <sub>табл</sub> )	R1 (n <sub>табл</sub> + 1)
1	120	120	120	160
10	1600	1800	1200	2000
90	18 000	16 200	16 200	21 600

проигрывает даже структуре R1 (при выполнении условия  $Q < q$ ). При  $W = 90$  Тбайт R5 уже выигрывает у R1 по числу дисков, но, как ни странно, проигрывает ему по надежности хранения информации (по графикам это определить трудно — факт установлен анализом массива расчетных данных). Поэтому и здесь архив на структурах R15 ( $n = 3$ ) оказывается предпочтительным.

В случае же, если стоит жесткое требование минимизации затрат на создание архива и при этом требуется обеспечить минимальное время доступа к информации (ограниченное временем ручного перемещения оптического диска из архива в оптический привод), то для небольшого архива с  $W = 1$  Тбайт наилучшим решением оказывается структура R1 (приобретение дополнительных оптических приводов исключается) с трехкратным дублированием каждого диска ( $n = 3$ ).

Для архива с объемом  $W = 10$  Тбайт выбор должен быть сделан только между структурами R1 ( $n = 4$ ) и R15 ( $n = 2$ ). Определив, используя [15], стоимость одного оптического привода  $C_{\text{п}} = 11\ 890$  руб. (была выбрана модель привода с максимальной стоимостью), можно легко рассчитать, что приобретение двух дополнительных оптических приводов для реализации структуры R15 обойдется дешевле, чем приобретение 400 дополнительных оптических дисков для структуры R1 даже при минимальной стоимости каждого оптического диска (23 780 руб. против 26 000 руб.), а поскольку использование дешевых оптических дисков для записи архивной информации категорически нежелательно, то разница в затратах будет существенно больше.

Для архива с объемом  $W = 90$  Тбайт очевидным выбором является структура R15 при  $n = 3$ .

### Выбор оптимального числа оптических дисков в каждом массиве RAID

Рассмотрим теперь вопрос выбора оптимального значения параметра  $k$ .

Очевидно, что с увеличением  $k$  будет уменьшаться удельная стоимость хранения единицы информации и одновременно будет возрастать вероятность отказа отдельно взятого массива. Кроме того, для обеспечения оперативного доступа к архивной информации (сборки массива RAID-5) необходимо будет иметь  $k + 1$  оптических приводов.

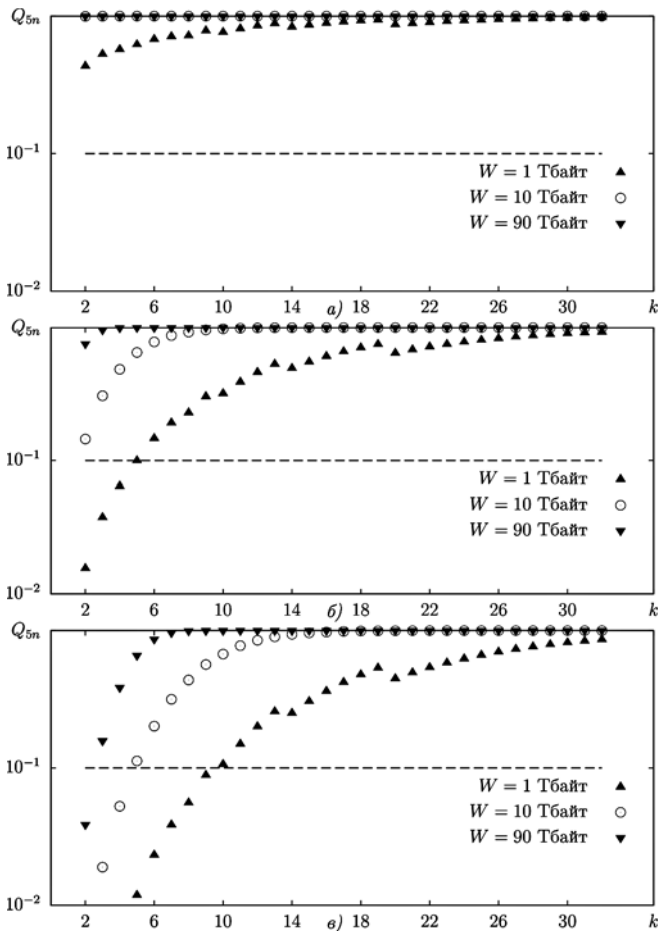


Рис. 4. Зависимость вероятности потери информации  $Q$  от числа дисков  $k$  в массиве RAID-5. Архив структуры R5: а —  $n = 1$ ; б —  $n = 1$ ; в —  $n = 3$

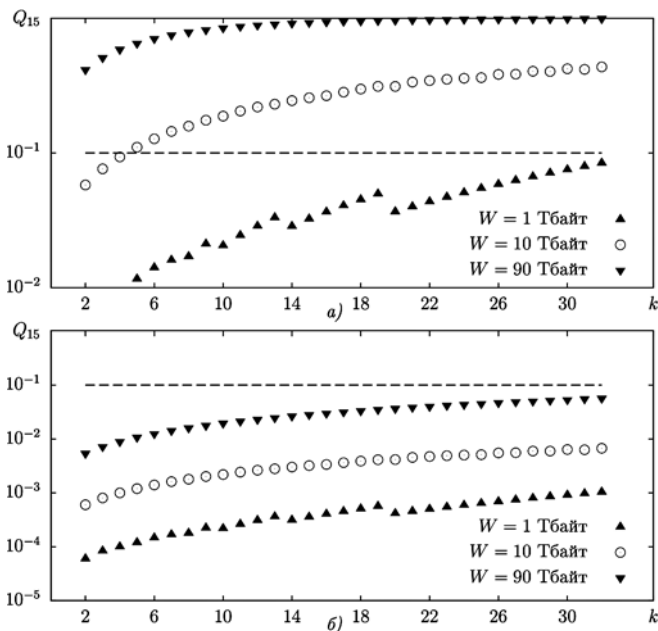


Рис. 5. Зависимость вероятности потери информации  $Q$  от числа дисков  $k$  в массиве RAID-5. Архив структуры R15: а —  $n = 2$ ; б —  $n = 3$

В связи с этим для небольших архивов (типа школьных музеев) вряд ли имеет смысл говорить о значении параметра  $k$  больше 2.

Однако изучение этого вопроса представляет интерес для понимания проблемы в общем. Например, для устройства, описанного в [4], производителем декларируется поддержка структур RAID на уровне картриджей оптических дисков, где один картридж содержит 12 оптических дисков.

На рис. 4 построены зависимости вероятности потери хотя бы части информации  $Q$  от числа дисков  $k$  в массиве RAID-5 для структуры R5 для разных значений  $n$ . На рис. 5 построены аналогичные зависимости для структуры R15. Для удобства сопоставления все зависимости, кроме приведенных на рис. 5, б, построены в одном масштабе по оси  $Y$ . В связи с этим некоторые точки для малых значений  $k$  на рисунках не показаны. Штриховая линия соответствует зависимости  $Q(k) = q$ .

По графикам на рис. 4, 5 можно сделать следующие практические выводы.

1. Подтвердился результат, что при  $n = 1$  условие  $Q < q$  недостижимо.

2. Для систем с оптическими дисками, упакованными в картриджи (структура R5):

— при  $n = 2$  условие  $Q < q$  выполнимо лишь для небольших значений  $k$  и лишь для объема архива  $W < 10$  Тбайт;

— при  $n = 3$  условие  $Q < q$  может быть выполнено даже для  $W = 90$  Тбайт, но лишь при  $k = 2$ ; для  $W = 1$  Тбайт оно выполняется для значений  $k$  от 2 до 9 включительно.

3. Для систем, в которых оптические диски в копиях массивов RAID-5 могут свободно обмениваться (структура R15):

— при  $n = 2$  условие  $Q < q$  выполняется при малых значениях  $k$  для  $W = 10$  Тбайт, а для  $W = 1$  Тбайт это условие будет выполняться для значений  $k$  по крайней мере до 32 (это на практике, вероятно, бессмысленно, но означает, что для практических целей может быть выбрано любое разумное значение параметра  $k$ );

— при  $n = 3$  условие  $Q < q$  выполняется для любого значения  $W$  вплоть до 90 Тбайт для значений  $k$  по крайней мере до 32.

## Заключение

В работе исследованы вопросы проектирования электронных архивных хранилищ ин-

формации для небольших организаций, когда необходимо обеспечить заданный уровень надежности хранения информации в архиве при минимизации стоимости архива. Причем современный стандарт создания электронных архивных хранилищ фактически требует использовать в качестве носителей информации в таких хранилищах однократно записываемые оптические диски. А реалии российского рынка позволяют однозначно сделать выбор в пользу дисков BD-R емкостью 25 Гбайт.

Основной проблемой использования оптических дисков в реальных (существующих сегодня) архивных хранилищах является невозможность предсказания вероятности выхода их из строя.

Предложено при проектировании задавать с вероятностью потери информации в архиве меньше, чем вероятность отказа одного оптического диска. Очевидно, что достижение этой цели возможно лишь при создании копий каждого архивного оптического диска.

Рассмотрены различные структуры, которые могут образовывать оптические диски в архиве:

— независимые диски с несколькими копиями (структура R1);

— массивы RAID-5 с несколькими копиями с жестко фиксированным набором дисков в каждом массиве (структура R5);

— массивы RAID-5 с несколькими копиями с возможностью обмена дисков между копиями (структура R15).

Показано, что:

— для архивов с объемом до 1 Тбайт привлекательной является структура R1 с созданием трех копий каждого оптического диска;

— для архивов с объемом более 1 Тбайт в большинстве случаев наиболее подходящей является структура R15, причем в зависимости от объема архива (в пределах до 90 Тбайт) для обеспечения заданной надежности хранения информации может потребоваться две или три копии каждого оптического диска (но не более трех);

— для существующих сегодня на рынке библиотек оптических дисков, использующих картриджи с оптическими дисками, нельзя рекомендовать создание массивов RAID-5 на базе всего объема картриджей, поскольку получающаяся в этом случае структура R5 даже для трех копий не обеспечивает заданного уровня надежности хранения информации в архиве.

1. **Школьный музей:** из века XX — в XXI // Музей. 2010. N. 07. С. 70—73. URL: [http://turcentrnf.ru/d/358156/d/001\\_persin-1.pdf](http://turcentrnf.ru/d/358156/d/001_persin-1.pdf) (дата обращения: 2015.12.26).

2. **Каташин В. В., Чернышов А. В.** Проблема надежного хранения файлов в архивных электронных хранилищах небольших организаций (на примере музеев) // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции. Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. С. 12—23.

3. **ГОСТ Р 54989—2012 / ISO TR 18492:2005** Обеспечение долговременной сохранности электронных документов. (Вступил в силу 01.05.2013).

4. **Data Archiver LB-DH8 series.** URL: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/> (дата обращения: 2016.02.01).

5. **ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library.** URL: <http://www.pro.sony.eu/pro/lang/en/eu/product/archiving-storage-oda-small-library/ods-l10/overview/> (дата обращения: 2016.05.17).

6. **Робот-библиотекарь** поселился в новом кампусе СПбГУ "Михайловская дача" // Санкт-Петербургский государственный университет. URL: <http://spbu.ru/smi/o-nas-pishut/24726-robot-bibliotekar-poselilsya-v-novom-kampuse-spbgu-mikhajlovskaya-dacha.html> (дата обращения: 2015.11.13).

7. **ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library. List Price.** URL: <https://pro.sony.com/bbsc/ssr/cat-datastorage/cat-opticaldiscarchive/product-ODSL10/> — Дата обращения: 2016.05.17.

8. **Устинов В.** Хранение данных на CD- и DVD-дисках: на наш век хватит? // BROADCASTING: Телевидение и радиовещание. 2006. N 4. URL: [http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie\\_dannyh\\_na\\_CD\\_DVD\\_diskah](http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie_dannyh_na_CD_DVD_diskah) (дата обращения: 10.12.2015).

9. **Zheng J., Slattery O. T.** NIST/Library of Congress Optical Disc Longevity Study: Final Report. 32 p. URL: [https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST\\_LC\\_OpticalDiscLongevity.pdf](https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST_LC_OpticalDiscLongevity.pdf) (Accessed 2016.05.11).

10. **Weatherspoon H., Kubiawicz J.** Erasure Coding vs. Replication: A Quantitative Comparison // Peer-to-Peer Systems, Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2429.

11. **Thomasian A., Tang Y., Hu Y.** Hierarchical RAID: Design, performance, reliability, and recovery // J. Parallel Distrib. Comput. 2012. Vol. 72. P. 1753—1769. Doi: 10.1016/j.jpdc.2012.07.002.

12. **Thomasian A.** Shortcut method for reliability comparisons in RAID // Journal of Systems and Software. 2006. Vol. 79. P. 1599—1605.

13. **Чернышов А. В.** К вопросу о применении оптических дисков для создания долговременных электронных архивных хранилищ информации небольших организаций // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 8. С. 635—640.

14. **Optical Jukeboxes and Libraries: KINTRONIX: IP Security Solutions.** URL: <https://kintronics.com/solutions/optical-jukeboxes-and-libraries/> (дата обращения: 2016.05.14).

15. **Жесткий диск HDD SATA** // Wikimart. URL: <http://computers.wikimart.ru/components/hdd/tag/hdd-sata/> (дата обращения: 17.12.2015).

16. **Blu-ray диски** для записи [Электронный ресурс] // Store52.ru: Магазин носителей информации. URL: [http://www.store52.ru/catalog/bluray\\_diski\\_dlya\\_zapisi](http://www.store52.ru/catalog/bluray_diski_dlya_zapisi) (дата обращения: 17.12.2015).

17. **BD-R DL** // Ресурс ПРО. URL: <http://resurs-pro.ru/catalog/bd-r-dl/> (дата обращения: 17.12.2015).



## The Study of the Properties of Long-Term Electronic Archival Information Storage on Optical Disks Organized into a Structure of RAID-5

*The problem is investigated of creating a local electronic archive information store for a small organization. Minimization of the cost of creating and maintaining archive is an important factor along with the reliability of information storage. Optical write-once disks organized in RAID-5 are proposed to be used for the purpose. A mathematical model of two alternatives such storages is constructed. It is proved that the best results in most cases are achieved when using the RAID-5 structure with backups of each disc. But with minimum size of storage (about 1 Tb) more profitable may be use single disks with three copy. It is shown that it is possible to increase the number of drives in the RAID-5 to reduce the unit cost of storing information with an acceptable decrease in reliability of storage.*

**Keywords:** *electronic archival storage of information, long-term storage, optical storage media, reliability of information storage, minimization of cost*

DOI: 10.17587/it.24.586-593

### References

1. **Shkol'nyj muzej: iz veka XX — v XXI.** [School Museum: from the XX century — to XXI.] (in Russian). *Muzej* [Museum], 2010, vol. 07, pp. 70–73. URL: [http://turcentrfr.ru/d/358156/d/001\\_persin-1.pdf](http://turcentrfr.ru/d/358156/d/001_persin-1.pdf). Access date: 2015.12.26.
2. **Katashin V. V., Chernyshov A. V. Problema nadjozhnogo hranenija fajlov v arhivnyh jelektronnyh hranilishhah nebol'shih organizacij (na primere muzeev).** [The problem of reliable storage of files in archival electronic storage of small organizations (on the example of museums)] (in Russian). *Perspektivy razvitiya informacionnyh tehnologij: sbornik materialov XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.* [Prospects of development of information technologies: proceedings of the XIX International scientific and practical conference]. Novosibirsk: CRNS, 2014, pp. 12–23.
3. **GOST R 54989—2012 / ISO TR 18492:2005 Obespechenie dolgovremennoj sohrannosti jelektronnyh dokumentov.** [Ensuring long-term preservation of electronic records.] (access date: 2013.01.05).
4. **Data Archiver LB-DH8 series.** URL: <http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/> (access date: 2016.02.01).
5. **ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library.** URL: <http://www.pro.sony.eu/pro/lang/en/eu/product/archiving-storage-oda-small-library/ods-l10/overview/> (access date: 2016.05.17).
6. **Robot-bibliotekar' poselilsja v novom kampuse SPbGU "Mikhajlovskaja dacha"** [Robot librarian settled in the new campus of SPSU "Mikhailovskaya dacha"] (in Russian). *Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet* [St. Petersburg state University]. URL: <http://spbu.ru/smi/o-nas-pishut/24726-robot-bibliotekar-poselilsya-v-novom-kampuse-spbgu-mikhajlovskaja-dacha.html>. Publ. date: October, 2015 (access date: 13.11.2015).
7. **ODS-L10 Optical Disc Archive 10-Slot library. List Price.** [Electronic resource]. URL: <https://pro.sony.com/bbsc/ssr/cat-datastorage/cat-opticaldiscarchive/product-ODSL10/> (access date: 2016.05.17).
8. **Ustinov V. Hranenie dannyh na CD- i DVD-diskah: na nash vek hvatit?** [Data storage on CD and DVD: on our century will suffice?] [Electronic resource] (in Russian). *BROADCASTING: Televidenie i radioveshhanie* [Television and broadcasting]. URL: <http://www.broadcasting.ru/articles2/Oborandteh/hranenie-dannyh-na-CD-DVD-diskah> (access date: 2015.10.12).
9. **Zheng J., Slattery O. T. NIST/Library of Congress Optical Disc Longevity Study: Final Report.** 32 p. URL: [https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST\\_LC\\_OpticalDiscLongevity.pdf](https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/NIST_LC_OpticalDiscLongevity.pdf) (access date: 2016.05.11).
10. **Weatherspoon H., Kubiawicz J. Erasure Coding vs. Replication: A Quantitative Comparison, Peer-to-Peer Systems, Lecture Notes in Computer Science, 2002, vol. 2429.**
11. **Thomasian A., Tang Y., Hu Y. Hierarchical RAID: Design, performance, reliability, and recovery, J. Parallel Distrib. Comput., 2012, vol. 72, pp. 1753–1769. doi: 10.1016/j.jpdc.2012.07.002**
12. **Thomasian A. Shortcut method for reliability comparisons in RAID, Journal of Systems and Software, 2006, vol. 79, pp. 1599–1605.**
13. **Chernyshov A. V. K voprosu o primenenii opticheskikh diskov dlja sozdanija dolgovremennyh jelektronnyh arhivnyh hranilishh informacii nebol'shih organizacij** [To the question of the optical discs application for long term digital archive storage of small organizations] (in Russian). *Informacionnye tehnologii.* [Information technologies]. 2016, vol. 22, no. 8, pp. 635–640.
14. **Optical Jukeboxes and Libraries: KINTRONIX: IP Security Solutions.** URL: <https://kintronics.com/solutions/optical-jukeboxes-and-libraries/> (access date: 2016.05.14).
15. **Hard disk with SATA interface** (in Russian), wikimart. URL: <http://computers.wikimart.ru/components/hdd/tag/hdd-sata/> (access date: 2015.12.17).
16. **Blu-ray diski dlja zapisi** [Blu-ray disks for writing.] (in Russian), *Store52.ru: Magazin nositelej informacii.* [Store52.ru: Shop of information media]. URL: [http://www.store52.ru/catalog/bluray\\_diski\\_dlya\\_zapisi](http://www.store52.ru/catalog/bluray_diski_dlya_zapisi) (access date: 2015.12.17).
17. **BD-R DL** (in Russian). URL: <http://resurs-pro.ru/catalog/bd-r-dl/> (access date: 2015.12.17).

**М. А. Стюгин**, канд. техн. наук, e-mail: styugin@gmail.com,  
**В. В. Золотарев**, канд. техн. наук, e-mail: amida.2@yandex.ru,  
**Н. Ю. Пароткин**, канд. техн. наук, e-mail: nyparotkin@yandex.ru,  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

## Подход к защите информационных систем от уязвимостей, не выявленных на стадии проектирования системы<sup>1</sup>

*Рассмотрена проблема защиты информационных систем от уязвимостей, не выявленных на стадии проектирования системы. Показано, что основной способ защиты от подобных уязвимостей — защита информационных систем и процессов от их исследования со стороны злоумышленника. В работе предложена формальная постановка задачи защиты от исследования, выраженная в получении неразличимых информационных систем по целевой функции и побочным каналам утечки информации. Доказывается, что неразличимая обфускация позволяет получить неразличимость по побочным каналам утечки данных. Предложен также способ приведения систем к неразличимости по целевой функции. Доказана работоспособность метода на примерах удаленных атак инъекции кода в приложение.*

**Ключевые слова:** защита от исследования, неразличимость, информационная безопасность, инъекция программного кода, неразличимая обфускация

### Введение

Проблема, обозначенная в заголовке данной статьи, столь фундаментальна и всеобъемлюща, что, найдя для нее решение, мы смогли бы раз и навсегда решить проблему информационной безопасности (ИБ) любых информационных систем. Действительно, если мы взглянем на все крупнейшие инциденты по защите информации за последний год, то обнаружим, что все они основаны на уязвимостях "нулевого дня", когда уязвимость найдена злоумышленником, но у служб безопасности было еще только 0 дней для ее обработки, анализа и устранения. Значительно растет рынок систем защиты, предназначенных для борьбы с "неизвестным". Сюда можно отнести, например, системы ATP (Advanced Threat Protection) или SIEM (Security Information and Event Management). Задача первых — анализировать поведение вредоносного ПО, которое не мо-

жет быть идентифицировано как вредоносное путем сигнатурных или эвристических методов, в то время как задача SIEM — обнаружить неизвестные инциденты за счет корреляции "странных" событий в машинных данных (например, пользователь авторизовался под своей учетной записью в офисе, в то время как по данным системы учета рабочего времени находился в отпуске). Но все это, безусловно, не дает каких-либо гарантированных показателей защищенности информационной системы.

В то время как инженеры наращивают базы корреляции событий ИБ и латают дыры в системах, основываясь на анализе последних инцидентов и обновлений базы CVE, научные исследования все более ориентируются на разработку методов построения систем защиты, которые давали бы возможность защититься от неизвестных уязвимостей, не выявленных на стадии проектирования. Решение такой задачи в области ИБ сравнимо с мечтой о построении "единой теории поля" в физике. Поэтому было бы логично придумать ей столь же запоминающееся название. Назовем ее *единой*

<sup>1</sup> Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований по проекту № 16-29-09456 офи\_м.

*теорией построения неразличимых информационных систем.* Почему "неразличимых"? Здесь мы сталкиваемся с проблемой информационной асимметрии между защитником и атакующим [1]. Атакующий относительно защитника действует в "завтрашнем дне", где располагает большей информацией о возможных способах атак на систему и имеет неограниченное время на ее исследование и анализ. Преодолеть эту информационную асимметрию можно только за счет защиты информационной системы от исследования.

В данной статье мы приведем краткий обзор трендов в этой области и определим, как задача построения неразличимой информационной системы может быть решена на примере конкретной модели.

### Обзор исследований

Публикации нескольких последних лет явно отражают рост интереса к проблеме защиты информационных систем от исследования в целях повышения безопасности. Защищая систему от исследования, мы затрудняем поиск уязвимостей в ней, при этом сами уязвимости не устраняя. Здесь можно выявить несколько различных подходов, одним из которых является борьба с монокультурой программного обеспечения (software monoculture) [2]. Допустим, злоумышленник получил в свое распоряжение одну из копий программного обеспечения и нашел в ней уязвимость, позволяющую реализовать внедрение и запуск исполняемого кода. Злоумышленник может сделать вывод, что все остальные копии данной программы с текущей версией также имеют данную уязвимость. Поскольку таких копий ПО могут быть тысячи и даже миллионы, он может написать скрипт, автоматизирующий процесс эксплуатации уязвимости, и нанести вред огромному числу пользователей и информационных систем. Для того чтобы этого не произошло, можно сделать так, чтобы каждая новая копия ПО была уникальна.

Решение этой проблемы заключается в рандомизации исполняемого кода (instruction-set randomization, ISR) [3, 4]. Основоположники технологии ISR утверждают, что сама идея взята из биологии, где организмы реагируют на множественные угрозы окружающей среды путем генетических изменений. По аналогии, механизм ISR изменяет основные исполняе-

мые инструкции таким образом, что встраиваемый сторонний код внутри приложения не приводит к корректному исполнению.

Другим популярным подходом диверсификации программного обеспечения, который получил большую популярность последние несколько лет, — это мутация исполняемого кода [5].

Автоматическая мутация программ позволяет также осуществлять автоматическое исправление ошибок. Как правило, такое автоматическое исправление ошибок заключается в применении различных паттернов структур программного кода (проверка дополнительных условий, преобразования циклов и пр.) [6].

Популярным методом в области защиты от неизвестных уязвимостей является также технология Moving Target Defense (MTD). Суть технологии заключается в защите системы от исследования путем ее непрерывного изменения. На сегодняшний день в публикациях насчитывается более 150 различных техник в области MTD. Наиболее известные методы MTD — это рандомизация адресного пространства (Address Space Layout Randomization — ASLR) [7], рандомизация данных [8], перемешивание адресации локальной сети [9], защита от DDoS атак [10], защиты от XSS (cross-site scripting) атак на сайт [11] и пр.

В данной статье мы попробуем формализовать задачу получения неразличимых информационных систем, когда обозначенные выше методы могут быть частным случаем достижения неразличимости.

### Формализация задачи

Любая формализация вынуждает нас перейти от абстрактной всеобъемлющей задачи к некоей более узкой проблеме. Первый шаг к такому переходу — это формализация самого понятия "информационная система". В рамках данной статьи будем предполагать, что информационная система — это некоторый черный ящик, имеющий вектор входных значений  $x$  и результирующий вектор работы системы  $y$ . Вектор  $y$  состоит из совокупности трех векторов  $(y_1, y_2, y_3)$ :  $y_1$  — это значения, возвращаемые как результат воздействия  $x$  на систему,  $y_2$  — это вектор изменения состояния системы и  $y_3$  — это побочный результат выполнения алгоритма, который может быть выражен, например, во временных задержках возврата значения  $y_1$ , побочных электромагнитных излучениях и пр.

По-другому  $y_3$  будем называть "отпечатком" работы алгоритма. На  $x$  мы не накладываем каких-либо ограничений, так он может включать в себя вектор изменения состояний системы  $y_2$ . В целом такая конструкция не меняет дальнейших выводов.

Обозначим также  $Y_1, Y_2, Y_3$  и  $X$  соответствующие множества, которым принадлежат данные вектора.

Целевая функция системы может быть выражена как

$$f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2.$$

Мы также можем выделить полезную функцию системы на основе полезного подмножества входных векторов  $X_u \subseteq X$ :

$$f: X_u \rightarrow Y_1 \times Y_2.$$

Полезная функция системы — это то, ради чего данная система была создана. Она единственная должна выполняться корректно и правильно. Очевидно, что все, что находится за пределами полезной функции, должно быть неразличимо для остальных участников системы, которые могут генерировать произвольные значения входа из множества  $X$ .

Добавим в систему уязвимости, выраженные как подмножество значений входа  $X_{vul} \subseteq X$ , которые на выходе формируют нежелательный для нас результат  $(Y_1 \times Y_2)_{attack}$ :

$$f: X_{vul} \rightarrow (Y_1 \times Y_2)_{attack}.$$

При этом  $X_{vul} \cap X_u = \emptyset$ . Также введем функцию побочных каналов утечки информации:

$$f_{sc}: X \rightarrow Y_3.$$

На основе предложенного формализма мы можем ввести два свойства неразличимости информационной системы:

- ◆ *неразличимость по целевой функции* — итеративный доступ к функции  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$  с наблюдаемыми значениями  $Y_1 \times Y_2$  дает информации о значениях множества  $X_{vul}$  не больше, чем в случае, когда  $Y_1 \times Y_2$  являются ненаблюдаемыми с точностью до пренебрежимо малых величин;
- ◆ *неразличимость по побочным каналам утечки информации* — итеративный доступ к функции  $f_{sc}: X \rightarrow Y_3$  с наблюдаемыми значениями  $Y_3$  дает информации о значениях целевой функции  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$  не больше,

чем в случае, когда  $Y_3$  являются ненаблюдаемыми с точностью до пренебрежимо малых величин.

*Неразличимая информационная система* — это такая система, которая обладает свойствами неразличимости по целевой функции и побочным каналам утечки информации.

Сделаем небольшие пояснения. Неразличимость по целевой функции означает, что злоумышленник путем отправки значений  $x \in X$  и получения от системы ответов  $(y_1, y_2)$ , где  $y_1 \in Y_1$  и  $y_2 \in Y_2$ , не получает какой-либо информации о любом из элементов  $x_{vul} \in X_{vul}$ , если ранее он этой информацией не обладал. Неразличимость по побочным каналам утечки информации означает, что наблюдение значений  $y_3 \in Y_3$  как результата работы системы не может быть злоумышленником сколько-нибудь осмысленно интерпретировано для того, чтобы получить информацию о целевой функции, выполняемой системой. Понятие "точность до пренебрежимо малых величин" означает, что в обоих случаях мы не можем найти вероятностно-полиномиальный алгоритм по прогнозированию неизвестных значений множества  $X_{vul}$  (в случае неразличимости по целевой функции) или ненаблюдаемых ранее значений функции  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$  (в случае неразличимости по побочным каналам) с вероятностью больше, чем пренебрежимо малая величина  $\alpha(\lambda)$ , неполиномиально быстро уменьшающаяся от некоторого параметра  $\lambda$ , характеризующего уровень стойкости системы ко взлому.

*Пример* неразличимости по целевой функции: путем отправки GET и POST запросов на сайт с различным составом и содержанием переменных злоумышленник не может определить, какие из запросов могут спровоцировать инъекцию кода, т. е. найти хоть один элемент  $x_{vul} \in X_{vul}$ .

*Пример* неразличимости по побочным каналам утечки информации: злоумышленник отправил несколько сообщений в некоторую информационную систему, где на них была сгенерирована цифровая подпись. При этом он анализировал все побочные каналы утечки информации: задержки времени, изменение напряжения питания информационной системы, электромагнитное излучение и пр. Вся полученная информация никак не повлияла на способность злоумышленника спрогнозировать значение цифровой подписи для ранее не подписанного сообщения  $m$ .

## Получение неразличимости по побочным каналам утечки информации

Интуитивно можно предположить, что, не зная алгоритм работы системы, мы не сможем интерпретировать информацию, полученную от нее по побочным каналам утечки информации.

Проведем далее формальное доказательство этого факта.

Допустим, у нас есть два различных алгоритма  $C_0$  и  $C_1$ , выполняющих различные функции  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$ , и также различные по функциям  $f_{sc}: X \rightarrow Y_3$ . Таким образом, мы имеем на каждый из алгоритмов его уникальный "отпечаток", выраженный в функциях  $f_{sc}^{(C_0)}$  и  $f_{sc}^{(C_1)}$ .

Предположим далее, что мы не знаем выполняемую системой функцию  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$ , но можем наблюдать значения функции  $f_{sc}: X \rightarrow Y_3$ . Таким образом, мы можем видеть "отпечатки" алгоритма  $f_{sc}^{(C_0)}$  и  $f_{sc}^{(C_1)}$ .

Допустим, у нас решена задача неразличимости функции  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$  по ранее полученным значениям входа и выхода. Иными словами, по полученным значениям  $(x_1, y_1^{(1)}, y_1^{(2)})$ ,  $(x_2, y_2^{(1)}, y_2^{(2)})$ , ...,  $(x_n, y_n^{(1)}, y_n^{(2)})$  для наблюдателя, выполняющего только полиномиально-вероятностные алгоритмы, задача вычисления корректного значения  $(x_k, y_k^{(1)}, y_k^{(2)})$  для ранее неиспользованного входа  $x_k$  является недостижимой с точностью до пренебрежимо малых величин.

Такая неразличимость по функции не обязательно будет сохраняться при наблюдении также значений  $f_{sc}: X \rightarrow Y_3$ . Например, злоумышленник может зафиксировать задержки в работе вычислителя, основанные на возведении в степень больших чисел. Зная принцип построения алгоритма цифровой подписи, он может по этим "отпечаткам" вычислить ключ и, тем самым, получить функцию  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$ , после чего генерировать новые пары значений  $(x_k, y_k^{(1)}, y_k^{(2)})$ .

Каждый алгоритм  $C_0$  может быть модифицирован таким образом, что функция  $f: X \rightarrow Y_1 \times Y_2$  останется неизменной, но при этом функция  $f_{sc}: X \rightarrow Y_3$  поменяется. Таким образом, мы можем получить множество алгоритмов  $C_0^0, C_0^1, \dots, C_0^n$ , выполняющих одинаковую функцию, но с различными "отпечатками"  $f_{sc}^{(C_0^0)}, f_{sc}^{(C_0^1)}, \dots, f_{sc}^{(C_0^n)}$ . Злоумышленник может получить все данные о соответствии алгоритмов и их "отпечатков".

**Теорема 1.** Если к алгоритму  $C$  информационной системы применить неразличимую обфускацию  $iO(C)$ , то такая система становится неразличимой по побочным каналам утечки информации.

Докажем это утверждение от противного. После того как мы обфусцировали алгоритм  $iO(C)$ , мы получили также новый "отпечаток"  $f_{sc}^{(iO(C))}$ . Если этот новый "отпечаток" не имеет какой-либо связи с "отпечатком" системы до обфускации, то на основании полученной по нему информации мы не сможем получить какую-либо информацию об используемом алгоритме. Предположим, что это не так. Возьмем два исходных алгоритма  $C_0$  и  $C_1$  равной функциональности, но с различными "отпечатками"  $f_{sc}^{(C_0)}$  и  $f_{sc}^{(C_1)}$ . Тогда существует такой вероятностно-полиномиальный алгоритм  $D$  (Distinguisher — различитель), для которого выполняется следующее равенство:

$$|\Pr[D(f_{sc}^{(iO(C_0))})] - \Pr[D(f_{sc}^{(iO(C_1))})]| > \alpha(\lambda),$$

где  $\alpha(\lambda)$  — пренебрежимо малая величина, а  $\lambda$  — параметр стойкости обфускации, определяющий класс исходных алгоритмов  $C_0$  и  $C_1$ ;  $\Pr$  — обозначение вероятности события. Далее из очевидной связи "отпечатков"  $f_{sc}^{(iO(C_0))}$  и  $f_{sc}^{(iO(C_1))}$  и исходных алгоритмов  $iO(C_0)$  и  $iO(C_1)$  следует существование вероятностно-полиномиального алгоритма  $D'$ , для которого выполняется условие

$$|\Pr[D'(iO(C_0))] - \Pr[D'(iO(C_1))]| > \alpha(\lambda).$$

Данное утверждение противоречит основному свойству неразличимой обфускации [12]. Таким образом, мы доказали, что информационная система, к алгоритму которой была применена неразличимая обфускация, становится неразличимой по побочным каналам утечки информации.

## Получение неразличимости по целевой функции

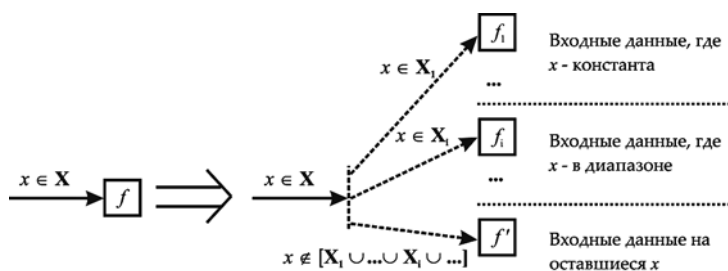
Если принять во внимание, что  $X_{vul} \cap X_u = \emptyset$ , то может возникнуть предположение, что достаточно просто ограничить множество входных параметров диапазоном  $X_u$  и тем самым сделать систему безопасной. Безусловно, есть случаи, для которых такая логика применима. Однако для большинства описанных информационных систем диапазон  $X_u$  столь огро-

мен, что валидировать его не представляется возможным. Примером может быть интернет-сайт, в котором есть форум для общения пользователей. Допустим, поле ввода комментария на форуме ограничено длиной 500 символов. Тогда все возможные входные данные для поля комментария ограничены значением  $256^{500}$ . Здесь могут быть и значения из пространства  $X_{vul}$ , опасные для системы, например инъекции SQL-запросов, XSS и пр. Таким образом, нужно как-то ограничить "бесконечность" — пространство  $X_u$  — с учетом того, что мы не можем знать все его значения. Свойство неразличимости по целевой функции требует, чтобы за пределами  $X_u$  не были предсказуемы такие значения  $X_{vul}$ , для которых мы получили бы  $f: X_{vul} \rightarrow (Y_1 \times Y_2)_{attack}$ .

Таких решений на сегодняшний день не существует, и, наиболее вероятно, они не могут быть найдены. В данной статье будет предложен метод, когда система может самомодифицироваться, приближаясь к состоянию неразличимости по целевой функции.

Рассмотрим информационную систему, реализующую некую функцию  $f$  на диапазоне входных данных  $X$ . Допустим, это некий скрипт, выполняющийся на веб-сервере. Запустив скрипт в работу и анализируя его выполнение, мы можем в дальнейшем разделить алгоритм работы скрипта по различным диапазонам входных значений (см. рисунок).

Некоторый фиксированный набор значений на входе может повторяться многократно. Таким образом, мы можем выделить конечный набор переменных и сделать для них "усеченную" копию исходного скрипта. При этом, анализируя выполнение кода на ограниченном наборе входных переменных, мы можем обнаружить, что некоторые условные операторы или подпрограммы не выполняются, и удалить их из "усеченного" скрипта. Если в выполнении скрипта не участвуют внешние переменные, то



Разделение функций работы скрипта по диапазонам

мы можем просто сгенерировать таблицу заранее вычисленных значений выхода. Это будет в некотором роде кеш программы. Таким образом, мы получаем набор скриптов  $f_1 \dots f_{(i-1)}$  для обработки фиксированных значений входа.

Следующий набор скриптов  $f_i \dots f_n$  выполняется на входных значениях, ограниченных в некотором диапазоне. Здесь мы можем проверить, что какая-то конкретная переменная является числом или имеет формат электронного адреса. Скрипты  $f_i \dots f_n$  также являются "усеченным" вариантом исходного скрипта с функцией  $f$  с выбрасыванием всех неиспользуемых условных операторов и подпрограмм по заданным диапазонам входных значений. Кроме этого, в скрипты на таких "диапазонных значениях" мы также добавляем программную избыточность. Эта избыточность добавляет случайные или псевдослучайные прямые и обратные преобразования в переменные и смену формата переменных, т. е. значение, которое пользователь ввел в поле ФИО, конкатенируется со строкой "123". С этим же значением конкатенируются переменные при считывании полей из базы данных. Таким образом, логика приложения не нарушается, но добавленная псевдослучайная избыточность не дает возможности предсказать, как именно будет обработан запрос. Один из таких методов описан в работе. Здесь применимы методы, описанные в начале статьи.

Оставшиеся данные, которые нельзя валидировать в каких-либо диапазонах, попадают в копию скрипта с функцией  $f'$ . Здесь уже применяется не только избыточность, но и модификация данных, не приводящая к нарушению логики работы программы, а также мутация алгоритмов. Здесь необходимо анализировать активность и, в случае попадания активности в полезную функцию работы системы, расширить диапазон значений по скриптам  $f_i \dots f_n$ .

Физически все копии исходного скрипта могут быть разнесены по разным вычислительным средам в зависимости от степени доверия к ним. Эксплуатация уязвимостей в модулях  $f_1 \dots f_{(i-1)}$  невозможна. Нахождение и эксплуатация уязвимостей в модулях  $f_i \dots f_n$  имеет пренебрежимо малую вероятность. Эксплуатация уязвимостей в модуле  $f'$  также невозможна, поскольку модуль представляет собой "песочницу" (все запросы в нем выполняются не на реальных, а на искусственно сгенерированных данных), но в него возможно попада-

ние легальных запросов, что может привести к проблемам функционирования системы.

### Практическая реализация системы с неразличимой целевой функцией

Описанный в предыдущем разделе механизм трансформации программ по диапазонам входных данных может эффективно справляться с любыми удаленными атаками, ориентированными на ошибки разработчика и инъекции программного кода. Однако для получения действительно эффективных механизмов защиты стоит рассмотреть алгоритмы, осуществляющие такую кластеризацию скрипта по входным диапазонам. Здесь может использоваться современный аппарат системного анализа и искусственного интеллекта. Для разработки таких алгоритмов необходимо дополнительное исследование.

В рамках настоящей работы нам необходимо подтвердить корректность достижения результатов исследования. Здесь мы не будем использовать сложные алгоритмы кластеризации и ограничимся только тремя блоками  $f_1, f_2, f'$ .

Разработанная техническая реализация получала на вход скрипт и некий набор входных значений. На основе автоматического анализа входных значений строился так называемый валидатор на входе скрипта, который адресовал выполнение программы к блокам  $f_1, f_2$  или  $f'$ . Входные значения для  $f_1$  — это все значения, которые повторились хотя бы один раз. Входные значения для  $f_2$  формировались автоматически по маскам диапазонов. В качестве примеров маски задавались форматы числа, электронной почты, строки без спецсимволов и даты. Соответственно, на вход  $f'$  попадало все, что не соответствовало валидации по двум другим блокам. В качестве смещения алгоритмов в блоке  $f_2$  использовались методы, описанные в работах [11, 13]. Блок  $f'$  имел доступ к базе данных посредством только механизма data masking.

Для эксперимента был использован скрипт с заранее известными точками входа для атак SQL-инъекций и межсайтового скриптинга. Ни одного положительного сценария атаки после кластеризации системы найдено не было. Более того, в результате пентестов (penetration test) не удалось исследовать диапазоны валидации значений сайта, поскольку ни один из входящих запросов системой не блокируется, даже если запрос содержит признаки инъекции кода.

### Заключение

В данной работе обозначен современный тренд построения систем безопасности на основе технологий, позволяющих защитить систему от внешнего исследования. Построена формальная модель неразличимой информационной системы. Данная модель позволяет решать задачи защиты информационных систем от исследования, когда множество входных значений может содержать недопустимые для системы данные, но при этом в силу своих размеров не может быть проверено на наличие уязвимостей. Доказано, что неразличимая обфускация делает алгоритм неразличимым по побочным каналам утечки информации. Разработан метод автоматического преобразования скрипта, позволяющий защитить алгоритм от исследования его работы за пределами полезной функции системы. Проведено практическое исследование корректности работы метода.

### Список литературы

1. **Jajodia S., Ghosh A. K., Subrahmanian V. S.** et al. Moving Target Defense II. Application of Game Theory and Adversarial Modeling. Series: Advances in Information Security. Springer-Verlag New York, 2013. 203 p.
2. **Gherbi A., Charpentier R.** Diversity-based approaches to software systems security // Communications in Computer and Information Science. 2011. Vol. 259. P. 228–237.
3. **Chan A.** Automated Program Diversity Using Program Synthesis // Proceedings — 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops, DSN-W 2017. 2017. P. 156–159.
4. **Styugin M., Zolotarev V., Prokhorov A., Gorbil R.** New Approach To Software Code Diversification In Interpreted Languages Based On The Moving Target Technology // Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2016). 2016. P. 1–5.
5. **Larsen P., Brunthaler S., Franz M.** Security through diversity // IEEE Security and Privacy. 2014. Vol. 12, Iss. 3. P. 28–35.
6. **GenProg:** A Generic Method for Automatic Software Repair / C. L. Goues и др. // IEEE Transactions on software engineering. 2012. Vol. 38, Iss. 1. P. 54–72.
7. **Chongkyung K., Jinsuk J., Bookhold C.** et al. Address Space Layout Permutation (ASLP): Towards fine-grained randomization of commodity software // Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC). 2006. P. 339–348.
8. **Bhatkar S., Sekar R.** Data space randomization // Lecture Notes in Computer Science. 2008. Vol. 5137. P. 1–22.
9. **Carroll T. E., Crouse M., Fulp E. W.** et al. Analysis of network address shuffling as a moving target defense // 2014 IEEE International Conference on Communications. 2014. P. 701–706.

10. **Ma D., Xu Z., Lin D.** Defending blind DDoS attack on SDN based on moving target defense // Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, LNICST. 2015. Vol. 152. P. 463–480.

11. **Portner J., Kerr J., Chu B.** Moving target defense against cross-site scripting attacks // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 8930. P. 85–91.

12. **Garg S., Gentry C., Halevi S., Raykova M., Sahai A., Waters B.** Candidate Indistinguishability Obfuscation and Functional Encryption for all Circuits // 2013 IEEE 54th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 2013. P. 40–49.

13. **Styugin M., Parotkin N.** Multilevel Decentralized Protection Scheme Based on Moving Targets // International Journal of Security and Its Applications. 2016. Vol. 10, N. 1. P. 45–54.

**M. A. Styugin**, Ph. D., e-mail: styugin@gmail.com,

**V. V. Zolotarev**, Ph. D., e-mail: amida.2@yandex.ru,

**N. Y. Parotkin**, e-mail: nyparotkin@yandex.ru,

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

## Protection of Information Systems from Undetected Vulnerabilities

*The problem of protecting information systems from vulnerabilities that were not detected at a system's development stage is considered. It is demonstrated that the main technique for protection from vulnerabilities of that kind is protecting information systems and processes from reconnaissance by an adversary. The formal definition of the protection's objective, which is establishing undistinguishable information systems with the target function and data leak side channels, is presented in the paper. Indiscernibility by target function means that attacker's ability to send data to the system and observe the results of its operation does not provide any information that can be used for exploiting the system's vulnerabilities. Indiscernibility by side channels means that observation of all external manifestations of the system's functioning, such as time delays, impact on the computing device, etc. do not provide any information on the value of the system's target function. The system's indiscernibility by target function can be established by separating the input value range and applying different processing logic for them. A modified algorithm for running in an untrusted computation environment should be implemented for non-standard input values. Proof is provided that indistinguishable obfuscation allows establishing Indistinguishability via data leak side channels. A method for providing a system's indistinguishability by the target function. The technique's effectiveness is demonstrated with instances of remote code injection attacks at an application.*

**Keywords:** protection from research, indistinguishability, code injection attack, indistinguishable obfuscation

DOI: 10.17587/it.24.594-600

### References

1. **Jajodia S., Ghosh A. K., Subrahmanian V. S.** at al. Moving Target Defense II. Application of Game Theory and Adversarial Modeling. Series: Advances in Information Security, Springer-Verlag New York, 2013, 203 p.

2. **Gherbi A., Charpentier R.** Diversity-based approaches to software systems security, *Communications in Computer and Information Science*, 2011, vol. 259, pp. 228–237.

3. **Chan A.** Automated Program Diversity Using Program Synthesis, *Proceedings — 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops, DSN-W 2017*, 2017, pp. 156–159.

4. **Styugin M., Zolotarev V., Prokhorov A., Gorbil R.** New Approach To Software Code Diversification In Interpreted Languages Based On The Moving Target Technology, *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2016)*, 2016, pp. 1–5.

5. **Larsen P., Brunthaler S., Franz M.** Security through diversity, *IEEE Security and Privacy*, 2014, vol. 12, iss. 3, pp. 28–35.

6. **GenProg:** A Generic Method for Automatic Software Repair / C. L. Goues et al, *IEEE Transactions on software engineering*, 2012, vol. 38, iss. 1, pp. 54–72.

7. **Chongkyung K., Jinsuk J., Bookhold C.** at al. Address Space Layout Permutation (ASLP): Towards fine-grained randomization of commodity software, *Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC)*, 2006, pp. 339–348.

8. **Bhatkar S., Sekar R.** Data space randomization, *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, vol. 5137, pp. 1–22.

9. **Carroll T. E., Crouse M., Fulp E. W.** at al. Analysis of network address shuffling as a moving target defense, *2014 IEEE International Conference on Communications*, 2014, pp. 701–706.

10. **Ma D., Xu Z., Lin D.** Defending blind DDoS attack on SDN based on moving target defense, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, LNICST*, 2015, vol. 152, pp. 463–480.

11. **Portner J., Kerr J., Chu B.** Moving target defense against cross-site scripting attacks, *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 8930, pp. 85–91.

12. **Garg S., Gentry C., Halevi S., Raykova M., Sahai A., Waters B.** Candidate Indistinguishability Obfuscation and Functional Encryption for all Circuits, *2013 IEEE 54th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 2013, pp. 40–49.

13. **Styugin M., Parotkin N.** Multilevel Decentralized Protection Scheme Based on Moving Targets, *International Journal of Security and Its Applications*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 45–54.



**А. С. Боровский**, д-р техн. наук, доц., e-mail: borovski@mail.ru,  
**Н. А. Шумилина**, ст. преподаватель, e-mail: shumilina\_na@mail.ru,  
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

### Метод интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в проектах промышленных предприятий

*На основе нечеткой ситуационной сети предложен метод выработки управленческих решений в проектной деятельности промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования. Для управления проектами вводится нечеткое представление исходных данных, определяется множество характеристик, ситуаций и правил нечеткого логического вывода для определения состояния оборудования и состояния проекта. Управляющие воздействия (затраты на обслуживание и ремонт оборудования, загрузка оборудования в проекте) формируются с учетом риска отказа оборудования. В соответствии с проектно-ориентированным подходом состояние оборудования и проекта представлено трехуровневой структурой нечеткой ситуационной сети: ситуационный уровень, сетевой уровень, факторный уровень.*

**Ключевые слова:** риск отказа оборудования, нечеткая ситуационная сеть, стратегия управления, управленческие решения

#### Введение

Управление проектом промышленного предприятия является сложным процессом, протекающим в условиях неполноты и неточности информации. В таких условиях возможны разнообразные и значительные по величине риски. Как показывает отечественная и зарубежная практика управления проектами, использование эмпирических правил и интуиции в этом случае не помогает, поэтому развитию методов и средств поддержки процессов идентификации, оценки, анализа рисков проекта уделяется большее внимание [1–3]. Традиционно в управлении рисками проекта выделяют [4]:

- для идентификация рисков: SWOT-анализ проекта;
- для учета рисков: CPM-метод, PERT-метод, GERT-метод;
- для минимизации последствий рисков: перевод ответственности за риск другой стороне за определенную плату, хеджирование с помощью биржевых инструментов, распределение рисков между участниками проекта, резервирование средств на покрытие непредвиденных расходов и т. д.

В управлении рисками отказов оборудования промышленных предприятий применяют [5]:

- методы надежности и безопасности опасных конструкций;
- методы управления безопасностью и предупреждения отказов, аварий и чрезвычайных ситуаций;
- стандарты, устанавливающие основные положения и структуру процедур контроля технического состояния и технического обслуживания производственного оборудования на основе оценки риска, например, для внедрения метода RBIM или метода FMEA [6].

Вопросами разработки научных методов оценки технического состояния оборудования и рисков отказа занимается целый ряд ученых. В работах используются теоретические основы конструктивной безопасности [7], логико-вероятностные модели состояния оборудования и нечеткое моделирование оценок состояния оборудования [8], комбинация возможностного и вероятностного подходов для прогноза последствий отказов оборудования [9].

Опыт практической реализации управления производственными активами промышленных предприятий активно делится специ-

алисты Санкт-Петербургской компании НПП "СпецТек" и Оренбургской компании ОАО "Техдиагностика" [5, 10].

Проведенный анализ по управлению проектными рисками показал, что на сегодняшний день слабо разработан инструментарий интеллектуальной поддержки принятия решений управления рисками отказа оборудования в деятельности промышленных предприятий, развивающихся на основе проектно-ориентированного подхода. Весь инструментарий представляет собой лишь набор разрозненных методик, решающих отдельные задачи идентификации риска, качественного анализа и количественной оценки риска.

Решения менеджера проекта на инвестиционной фазе по составу оборудования как объекту инвестирования существенно влияют на эффективность проекта. На эксплуатационной фазе решения по фактическому уровню освоения производственных мощностей связаны с обоснованием поддержания готовности оборудования и эффективности проекта. Таким образом, актуальна поддержка принятия решений в стратегических задачах управления проектом, которая обеспечит оптимизацию затрат на техническое обслуживание, ремонт и владение активами при минимуме рисков.

При выборе методологических основ для разработки интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в проектах промышленных предприятий учитывалось, что объект управления представлен совокупностью подсистем и элементов, имеющих разнообразную физическую природу, варьируемые параметры и управляющие воздействия, совокупность частных критериев оптимальности, отражающих различные стороны эффективности и качества проекта в деятельности предприятия. Процесс принятия управленческих решений возлагается на менеджера проекта и должен приводить к выработке стратегии управления проектом с определенным уровнем риска.

Для управления сложными объектами и процессами различной природы, характеризующихся перечисленными особенностями, применяют [11, 18]:

- методы нечеткого моделирования, которые в значительной степени основаны на знаниях экспертов;
- методы ситуационного управления сложными объектами в контексте создания ин-

теллектуальных управляющих систем и систем поддержки принятия решений.

Методы нечеткого моделирования в определении риска отказа проекта по состоянию оборудования позволят преодолеть следующие неопределенности и неточности:

- неопределенность, связанную с практической неограниченностью числа состояний оборудования, с невозможностью учета всех факторов, действующих на состояние оборудования, с условностью мер надежности состояния оборудования и т. д.
- неточность, связанную с тем, что интенсивность отказов может быть постоянной и непостоянной, объем исходной информации может быть недостаточным для определения показателей интенсивности отказов и т. д.

Если рассматривать возможность оценки проектных рисков по коммерческой эффективности реализация проекта, то в этом направлении также наблюдается возможность использования аппарата нечеткой логики. В работах [12] приводятся аргументы и примеры в пользу использования возможностей данного аппарата.

В статье описан интеллектуальный метод управления проектами промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования на основе нечеткой ситуационной сети.

Интеграция предлагаемого решения возможна при наличии информационных подсистем следующего уровня:

1) подсистема диспетчерского управления для сбора данных о параметрах технологических процессов и состоянии оборудования, например, программные решения на платформах Wonderware, Siemens;

2) подсистема управления информацией, используемая для сбора, хранения и анализа производственных данных, например, средствами Historian, Active Factory + VBA. NET + Excel;

3) подсистема планирования проектов и генерации отчетов, например, программные средства MS Project Server, Oracle Primavera, HP PPM.

Из множества технико-экономических показателей проекта, показателей загрузки оборудования в проектном цикле, показателей режимов ремонта и обслуживания оборудования в соответствии с заданным уровнем риска определяется стратегия управления проектом. На основании представленной информации руководитель формирует управленческие решения, направленные на улучшение существен-

ных показателей коммерческой эффективности проекта, в рассматриваемой ситуации.

### 1. Особенности ситуационного управления состоянием оборудования проектов промышленных предприятий с учетом риска его отказа

С практической точки зрения описание ситуационного управления должно отражать изменение уровня значений параметров (характеристик) оборудования и параметров (характеристик) проекта [13–15].

В рассматриваемом случае под ситуацией следует понимать описание состояния оборудования в проекте в некоторый момент времени как объекта управления, для которого требуется определить стратегию загрузки, стратегию обслуживания и ремонта в соответствии с уровнем риска отказа оборудования в проекте [19, 20]. Системное представление задачи для применения интеллектуальных методов ситуационного управлению по фазам жизненного цикла проекта разработано в табл. 1.

Состояние оборудования в проекте представляем некоторым множеством ситуаций  $S = \{S^1, \dots, S^K\}$ . Из множества управлений  $R = \{R_1, \dots, R_n\}$  определяем  $R_i$ , соответствующее ситуации  $S^i \in S$ , которое способствует поддержанию заданного уровня эффективности проекта с учетом риска отказа оборудования. При

этом  $S^i$  — текущая ситуация, а  $S_{ц}^i$  — целевая ситуация, в которую необходимо перевести состояние оборудования и состояние проекта путем выстраивания стратегии загрузки, обслуживания и ремонта оборудования.

Для представления ситуаций использовано множество факторов  $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9\}$ , характеризующих так называемые кривую интенсивности отказов и кривую жизненного цикла проекта:

- $y_1$  — эффективный возраст ( $T_{эф}$ );
- $y_2$  — интенсивность отказов оборудования ( $\lambda(t)$ );
- $y_3$  — сменность работы оборудования ( $T_{см}$ );
- $y_4$  — условия работы оборудования ( $T_{пр}$ );
- $y_5$  — характер производства ( $T_{тц}$ );
- $y_6$  — средняя наработка на отказ ( $T_{ср}$ );
- $y_7$  — среднее время ремонта ( $t_{ср}$ );
- $y_8$  — горизонт планирования проекта ( $T$ );
- $y_9$  — планируемая производственная мощность ( $ПМ_n$ ).

В множестве ситуаций  $S$  выделено минимальное подмножество эталонных ситуаций  $S_0$  по состоянию оборудования и по состоянию проекта:

- начальное состояние оборудования в проекте;
- износ оборудования в проектном цикле;
- простой оборудования в проектном цикле;
- поддержка состояния производственных мощностей;

Таблица 1

Представление ситуационного управления по фазам проекта

Фаза проекта	Инвестиционная фаза	Эксплуатационная фаза
Задача	Принятие решений по формированию состава оборудования при планировании проекта	Выработка управляющих воздействий по техническому обслуживанию и ремонту оборудования, а также по загрузке оборудования в рамках жизненного цикла проекта
Ситуации	В состав основных производственных фондов входит: только новое оборудование; ранее использовавшееся работоспособное оборудование; смешанное оборудование (и новое, и ранее использовавшееся работоспособное оборудование)	
Стратегии управления	Включить рассматриваемую позицию в перечень оборудования проекта/не включать	Время межремонтного цикла (увеличить/уменьшить) Загрузка оборудования (увеличить/уменьшить)
Характеристики ситуации	Состояние оборудования Планируемая загрузка Продолжительность проекта	Состояние оборудования Фактическая загрузка Продолжительность проекта
Параметры, характеризующие прогнозируемое состояние после управляющего действия	Уровень риска отказа оборудования Затраты на обслуживание оборудования Объем инвестиций в проект	Уровень риска отказа оборудования Уровень недоиспользования оборудования в проектном цикле Затраты на обслуживание оборудования
Целевые ситуации	Реализация проекта по зонам допустимого риска	Реализация проекта по зонам допустимого риска Закрытие проекта

- уровень освоения производственных мощностей;
- эффективность использования производственных мощностей.

Модель разрабатываем как нечеткую ситуационную сеть, в которой заданы следующие элементы структуры: множество ситуаций, множество управлений  $R = \{R_1, \dots, R_f\}$  и биективное соотношение вида  $L:S \rightarrow R$  [15, 16, 18].

Сеть представлена через  $S^1$  и  $S^2$  значениями нечеткого множества признаков ситуаций, включающего подмножество наблюдаемых переменных (факторов)  $Y$ . Признаки с привлечением экспертов переведены в лингвистические переменные вида

$$\langle \beta_i, B_i, D_i \rangle,$$

где  $\beta_i$  — обозначение признака;  $B_i = \{B_{1i}, B_{2i}, \dots, B_{mi}\}$  —  $m$ -мерное множество термов лингвистической переменной  $i$ -го признака с функциями принадлежности  $\mu_{B_{ij}}(p_i)$  ( $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ );  $D_i$  — базовое множество признака.

Управляющие воздействия  $R_l$  ( $l \in \{1, 2, \dots, f\}$ ) с привлечением экспертной группы описаны лингвистическими переменными вида

$$\langle \gamma_l, A_l, D_l \rangle,$$

где  $\gamma_l$  — обозначение управляющего воздействия;  $A_l = \{A_{1l}, A_{2l}, \dots, A_{nl}\}$  —  $n$ -мерное множество термов с функциями принадлежности  $\mu_{A_{lq}}(r_l)$  ( $q \in \{1, 2, \dots, n\}$ );  $D_l$  — базовое множество признака.

Применение одного или одновременно нескольких управляющих воздействий из базового множества приводит к набору прогнозируемых состояний, характеризующихся двумя параметрами:

- уровень риска отказа оборудования ( $u_1$ );
- уровень затрат по проекту ( $u_2$ ).

При разработке нечеткой ситуационной сети были приняты следующие допущения:

- в проекте рассматривается один основной технологический процесс;
- риск отказа оборудования рассматривается в зависимости от времени его эксплуатации;
- режимы эксплуатации оборудования в проекте — нормальные, характеризующиеся номиналь-

ными значениями всех параметров в соответствии со стандартами, техническими условиями и инструкциями;

- ситуации описываются качественными категориями, характеризующимися интервальными значениями переменных (факторами) состояния оборудования и проекта.

Разработанная сеть не применяется для неспособного (сильно изношенного, разукomплектованного, после аварии) оборудования, подлежащего списанию и утилизации.

## 2. Трехуровневая иерархическая нечеткая ситуационная сеть принятия управленческих решений в проектах промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования

Выделяем три уровня иерархии в описании: ситуационный, сетевой и факторный [17]. Результат представлен на рис. 1.

Ситуация  $S$  в проекте сформирована по двум классам типовых ситуаций:

- $S^1$  — типовые нечеткие ситуации по состоянию оборудования в проекте;
- $S^2$  — типовые нечеткие ситуации по состоянию производственных мощностей (ПМ) проекта.

На сетевом уровне для  $S^1$  типовые нечеткие ситуации учитывают период работы оборудования после монтажа или ремонта, когда интенсивность отказов достаточно высокая, период нормальной эксплуатации оборудования с практически неизменной интенсивностью отказов, период старения отдельных узлов и

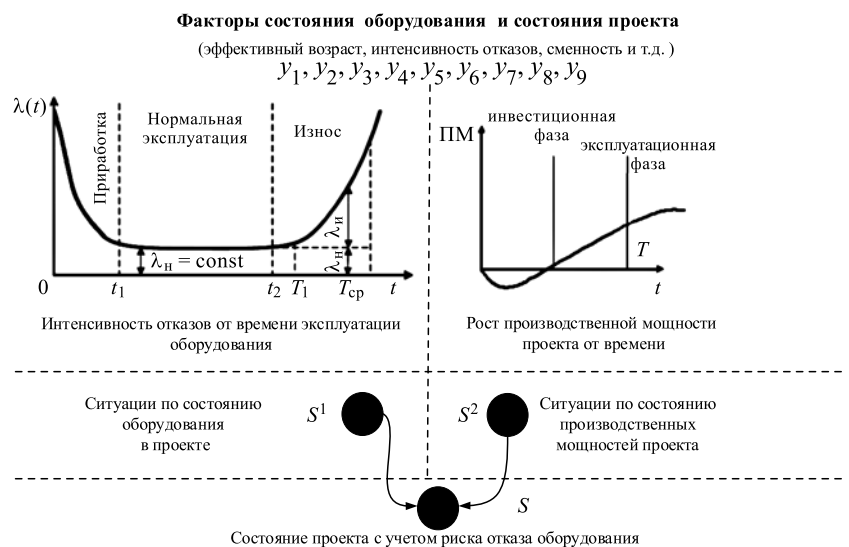


Рис. 1. Трехуровневая нечеткая ситуационная сеть

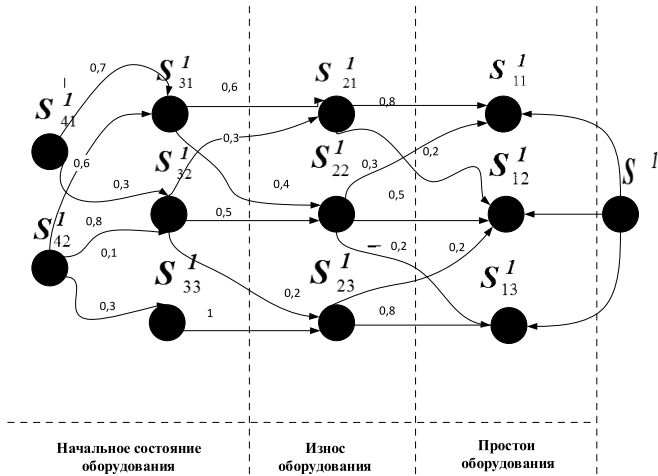


Рис. 2. Типовые нечеткие ситуации на сетевом уровне для  $S^1$

оборудования в целом. Результаты представлены на рис. 2:

- *1-й уровень* — типовые нечеткие ситуации, отражающие простои оборудования в проектном цикле:
  - $S^1_{11}$  — малое общее время простоя в проектном цикле;
  - $S^1_{12}$  — среднее время простоя в проектном цикле;
  - $S^1_{13}$  — длительное время простоя в проектном цикле.
- *2-й уровень* — типовые ситуации, отражающие износ оборудования:
  - $S^1_{21}$  — низкая скорость потери ресурса;
  - $S^1_{22}$  — средняя скорость потери ресурса;
  - $S^1_{23}$  — высокая скорость потери ресурса.
- *3-й и 4-й уровни* — типовые ситуации, которые учитывают начальное состояние оборудования в проекте:
  - $S^1_{31}$  — незначительные устранимые дефекты;
  - $S^1_{32}$  — значительные устранимые дефекты;
  - $S^1_{33}$  — неустранимые дефекты;
  - $S^1_{41}$  — незначительные недостатки монтажа;
  - $S^1_{42}$  — существенные недостатки монтажа.

На сетевом уровне для  $S^2$  типовые нечеткие ситуации учитывают влияние режима эксплуатации оборудования и режимов его обслуживания на освоение производственных мощностей проекта. Результаты представлены на рис. 3:

- *1-й уровень* — типовые ситуации, отражающие эффективность использования производственных мощностей в проекте:
  - $S^2_{11}$  — низкая эксплуатационная готовность оборудования в проекте;

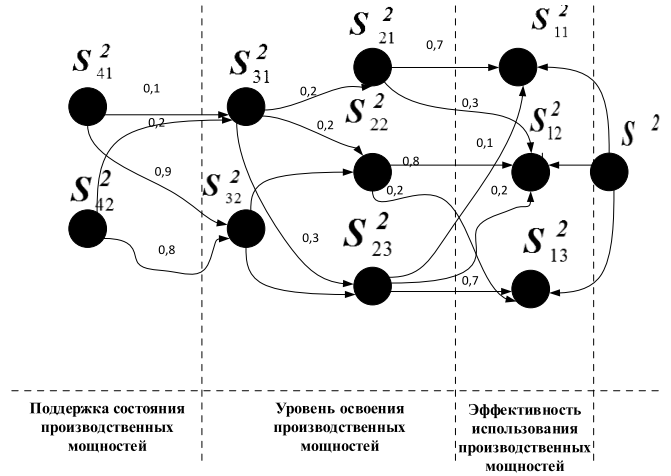


Рис. 3. Типовые нечеткие ситуации на сетевом уровне для  $S^2$

$S^2_{12}$  — средняя эксплуатационная готовность оборудования в проекте;

$S^2_{13}$  — высокая эксплуатационная готовность оборудования в проекте.

- *2-й и 3-й уровни* — типовые ситуации, отражающие уровень освоения производственных мощностей проекта:
  - $S^2_{21}$  — низкая скорость освоения производственных мощностей;
  - $S^2_{22}$  — средняя скорость освоения производственных мощностей;
  - $S^2_{23}$  — высокая скорость освоения производственных мощностей;
  - $S^2_{31}$  — несущественный срыв производственного процесса;
  - $S^2_{32}$  — существенный срыв производственного процесса.
- *4-й уровень* — типовые ситуации, определяющие уровень поддержки работоспособного состояния оборудования для освоения мощностей проекта:
  - $S^2_{41}$  — удовлетворительная работа ремонтных служб;
  - $S^2_{42}$  — неудовлетворительная работа ремонтных служб.

Таким образом, экспертным путем из всего многообразия ситуаций образованы эталонные ситуации. Распознавание текущей ситуации сводится к определению степени включения конкретной ситуации в эталонную по значению признаков и определению степени истинности высказывания (импликация и конъюнкция):

$$v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \bigwedge_Y v(\mu_{si}(Y), \mu_{sj}(Y));$$

$$v(\mu_{si}(Y), \mu_{sj}(Y)) = \&_{B_m} (\mu_{si(Y)}(B_m) \rightarrow \mu_{sj(Y)}(B_m));$$

$$\mu_{si(Y)}(B_m) \rightarrow \mu_{sj(Y)}(B_m) =$$

$$= \max(1 - \mu_{si(Y)}(B_m), \mu_{sj(Y)}(B_m)).$$

Определение степени включения осуществляется поэтапно, начиная с верхнего уровня иерархии эталонных ситуаций и заканчивая нижним. Под иерархией рассматривается причинно-следственная связь изменения состояния оборудования с момента включения его в состав основного технологического процесса проекта до завершения проекта, в зависимости от уровня загрузки и режима обслуживания и ремонта.

### 3. Пример формирования стратегии управления проектом с учетом риска отказа оборудования на основе нечеткой ситуационной сети

На примере проекта деревообрабатывающей производственной компании Оренбургской области рассмотрим применение разработанного метода. В данном примере стоит задача оптимизации состава производственного оборудования проекта за счет варьирования объема инвестиционных вложений в приобретение нового/дополнительного оборудования. Данная задача относится к инвестиционной фазе проекта. В качестве критериев принятия решения рассматриваем критерии коммерческой эффективности проекта.

Исследуем действующее оборудование, следовательно, нет необходимости рассматривать начальное состояние по недостаткам монтажа.

Признаки для  $S_{21}^1, S_{32}^1, S_{42}^1$  представляем следующими лингвистическими переменными:  $\langle y_4, y_7 \rangle, \langle y_1, y_2, y_6 \rangle, \langle y_3, y_4, y_5, y_6 \rangle$ . В табл. 2 пред-

ставлены результаты экспертной оценки параметров для каждого технологического объекта основных фондов проекта, являющихся входными лингвистическими переменными [20].

Методика формирования лингвистических переменных представлена в работе [21].

Текущую ситуацию описываем по состоянию оборудования на сетевом уровне  $S^1$  следующими признаками: " $S_{31}^1$  — незначительные устранимые дефекты", " $S_{22}^1$  — средняя скорость потери ресурса" и " $S_{12}^1$  — среднее время простоя в проектном цикле".

Текущие ситуации:

$S_{31}^1 = \{ \langle 0,8/T_4^1 \rangle, \langle 0,2/T_7^1 \rangle, \langle 0,1/T_3^1 \rangle \} /$   
незначительные устранимые дефекты};

$S_{22}^1 = \{ \langle 0,3/T_1^1 \rangle, \langle 0,8/T_2^1 \rangle, \langle 0,2/T_6^1 \rangle \} /$   
средняя скорость потери ресурса};

$S_{12}^1 = \{ \langle 0,1/T_1^1 \rangle, \langle 0,9/T_2^1 \rangle, \langle 0,2/T_3^1 \rangle \} /$   
среднее время простоя в проектном цикле}.

Фрагмент правил, сформулированных экспертами для оценки уровня начального состояния оборудования в проекте по уровню дефектов:

- *Правило 1.* Если  $\beta_4$  есть "специальное помещение",  $\beta_7$  есть "не проводились", то  $S^1$  есть " $S_{21}^1$  — незначительные устранимые дефекты";
- *Правило 2.* Если  $\beta_4$  есть "вредные условия",  $\beta_7$  есть "не проводились", то  $S^1$  есть " $S_{22}^1$  — значительные устранимые дефекты";
- *Правило 3.* Если  $\beta_4$  есть "условия повышенной загрязненности",  $\beta_7$  есть "не проводились", то  $S^1$  есть " $S_{23}^1$  — неустраняемые дефекты" и т. д.

Далее аккумулируем заключения с помощью операции дизъюнкции по сетевому уровню.

В предлагаемом подходе результаты вариантов управленческих решений — это относительное изменение объема инвестиций и по-

Таблица 2

Оценки лингвистических переменных для рассматриваемого проекта

Вид	Эффективный возраст	$\lambda(t)$	Сменность	Условия работы	Характер производства	Среднее время ремонта
Станок 1	31,2	$0,9 \cdot 10^{-5}$	2,2	1,5	0,9	30
Станок 2	37,3	$0,7 \cdot 10^{-6}$	1,9	1,5	0,7	20
Станок 3	22,2	$1 \cdot 10^{-9}$	2,9	1,5	1	50
Станок 4	37,2	$0,8 \cdot 10^{-6}$	2,5	3	0,83	30
Станок 5	25,5	$0,9 \cdot 10^{-6}$	2,9	4,5	0,9	9
Станок 6	23,2	$1 \cdot 10^{-8}$	3	5	1	5
Станок 7	37,3	$0,6 \cdot 10^{-7}$	0,8	3,5	0,67	50

Таблица 3

Результаты оценки эффективности для различных зон  
производственного риска

Наименование показателя	Минимальный	Допустимый	Недопустимый
$\Delta V_{\text{инв}}$ , %	-38	-53,8	-71,4
$\Delta NPV$ , %, $\Delta IRR$ , %	7,8 12,2	11,3 25,6	17,0 37,3
<i>V</i> — объем инвестиций; <i>NPV</i> — чистая приведенная стоимость; <i>IRR</i> — внутренняя норма доходности			

казателей эффективности проекта к базисному варианту проекта, рассчитанному без учета производственного риска. Результаты представлены в табл. 3.

Стратегия выработки управленческих воздействий на инвестиционной фазе рассматриваемого проекта — это затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования, а также объем инвестиций, которые необходимы для вложения в приобретение нового/дополнительного оборудования.

### Заключение

В статье разработано системное представление процесса управления проектом с учетом риска отказа оборудования. Метод интеллектуальной поддержки позволяет на основе множества требуемых показателей проекта и фактических данных о состоянии оборудования сформировать набор лингвистических характеристик. Характеристики с привлечением знаний экспертов оформляются в набор эталонных ситуаций, и создается ситуационная сеть. Ситуация в проекте рассматривается по двум классам:

- типовые нечеткие ситуации по состоянию оборудования в проекте;
- типовые нечеткие ситуации по состоянию производственных мощностей проекта.

На основании экспертных знаний и требований нормативной документации руководитель формирует управленческие решения по проекту, представленные стратегией загрузки оборудования, стратегией обслуживания и ремонта оборудования. Стратегия направлена на улучшение существенных показателей проекта в рассматриваемой ситуации по уровню риска отказа оборудования.

Перспектива развития разработанного метода интеллектуальной поддержки может быть

связана с ее внедрением в контур стратегического управления развитием промышленных предприятий в рамках ILS. Нечеткое ситуационное управление в этом случае позволяет отражать взаимодействие всех подсистем проекта и предприятия, используя возможности моделирования бизнеса и прикладных технологий контроля технологических процессов.

### Список литературы

1. Alan Moran. Risk management in Agile Projects // ISACA journal. 2016. Vol. 2. P. 14—17. URL: <https://www.isaca.org/Journal/archives/2016/volume-2/Documents/Journal-volume-2-2016.pdf> (дата обращения: 15.04.18).
2. Marian Andrei Gurau, Lucia Violeta Melnic. Management of risk in industrial projects evaluation // International journal of Academic Researchin Management (IJARM). 2014. Vol. 3. N. 2. P. 167—175. URL: <http://elvedit.com/journals/IJARM/wp-content/uploads/2014/03/Management-of-Risk-in-Industrial-Projects.pdf> (дата обращения: 15.04.18).
3. Кориенко О. Ю., Макарова В. А. Актуальные вопросы оценки эффективности корпоративного риск менеджмента. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 279 с. URL: <https://www.hse.ru/pubs/share/direct/document/175936493> (дата обращения: 15.04.18).
4. Матвеев С. "Территория" контроллинга // Управление предприятием. 2013. № 8 (31). URL: [http://upr.ru/upload/iblock/c4a/Matveev-\\_\\_\\_-0831\\_pBUX.pdf](http://upr.ru/upload/iblock/c4a/Matveev-___-0831_pBUX.pdf) (дата обращения: 15.04.18).
5. Лепихин А. М., Москвичев В. В., Доронин С. В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/nadezhnost-zhivuchest-i-bezopasnost-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 15.04.18).
6. Thomas A. Carbone, Donald D. Tippett. Project risk management using the project risk FMEA // Engineering Management Journal. 2004. Vol. 16. P. 28—35. URL: <http://www.tomcarbone.com/papers/Carbone-RFMEA-EMJDec04.pdf> (дата обращения: 15.04.18).
7. ОАО "Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика". Система методов управления безопасностью технологического оборудования по критериям риска отказа. Проспект результатов разработок к 15-летию организации предприятия. г. Оренбург. 2006 г. 44 с.
8. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зинякова В. Ю. Комбинированное логико-вероятностное и лингвистическое моделирование отказов сложных систем // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 35—42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kombinirovannoe-logikoveroyatnostnoe-i-lingvisticheskoe-modelirovanie-otkazov-slozhnyh-sistem> (дата обращения: 15.04.18).
9. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Издательская группа URSS, ООО "ЛЕНАНД", 2016. 256 с.
10. Кац Б. А., Антоненко И. Н., Молчанов А. Ю. Информационные системы управления производственными активами. История, состояние и перспективы // Автоматизация и новые технологии. 2015 г. ТПА 3 (78). URL: [http://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information\\_systems\\_asset\\_management.pdf](http://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf) (дата обращения: 15.04.18).
11. Карелин В. П. Интеллектуальные технологии и системы искусственного интеллекта для поддержки принятия решений // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2011. № 2. С. 79—84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/intellektualnye-tehnologii-i-sistemy-iskusstvennogo-intellekta-dlya-podderzhki-prinyatiya-resheniy> (дата обращения: 15.04.18).

12. Недосекин А. О. Применение теории нечетких множеств к задачам управления финансами // Аудит и финансовый анализ. 2000. № 2. URL: <http://www.cfin.ru/press/afa/2000-2/08-2.shtml> (дата обращения: 15.04.18).
13. Русин А. Ю., Абдулхамед М., Барышев Я. В. Алгоритмы автоматизированной системы управления испытанием оборудования на надежность // Программные продукты и системы. 2016. № 2 (114). URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page = article&id = 4143> (дата обращения: 15.04.18).
14. Шаханов В. И., Варфоломеев И. А., Ершов Е. В., Юдина О. В. Прогнозирование отказов оборудования в условиях малого количества поломок // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/prognozirovanie-otkazov-oborudovaniya-v-usloviyah-malogo-kolichestva-polomok> (дата обращения: 15.04.18).
15. Меньшиков В. И., Меньшикова К. В. Практическое использование метода ситуационного управления в системах менеджмента безопасной эксплуатации // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2004. Т. 7, № 3. С. 370—374.
16. Боровский А. С., Тарасов А. Д. Принятие проектных решений на основе моделей "Ситуация — стратегия управления — действие" для модернизации физической защиты // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10, № 3. С. 60—67.
17. Кригер Л. С., Квятковская И. Ю. Формализация типовых ситуаций в задачах управления движением общественного транспорта // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2012. № 3 (150). С. 106—110.
18. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
19. Гаибова Т. В., Шумилина Н. А. Адаптивное управление процессом освоения проектных мощностей с учетом производственного риска отказа оборудования // Интернет-журнал "Науковедение". 2015. Т. 7, № 3 (28). С. 96.
20. Гаибова Т. В., Шумилина Н. А. Формализация задачи управления проектным риском отказа оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 90—93.
21. Шумилина Н. А., Арефьева А. В., Дружаев О. В. Расчтно-аналитическая работа экспертных групп (I-expert): прикладная программа / Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ (Роспатент) № 2017663457. Заявлено 12.10.2017. Зарегистрировано 04.12.2017.
22. Гаибова Т. В., Шумилина Н. А. Оценка проектного риска отказа оборудования на основе теории нечетких множеств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. № 2. С. 10—16.

A. S. Borowski, Professor, e-mail: borowski@mail.ru,  
N. A. Shumilina, Senior lecturer, e-mail: shumilina\_na@mail.ru,  
Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

## Predictive Support for Decision-Making in Projects of Industrial Enterprises

*Based on the fuzzy situation network, a method for developing managerial decisions in the design activity of industrial enterprises was proposed, taking into account the risk of equipment failure. To manage projects, a fuzzy representation of the input data is introduced, a lot of characteristics, situations and rules of fuzzy inference are determined to determine the state of the equipment and the status of the project.*

*The task of situational management for the phases of the life cycle of the project:*

- making decisions on the composition of equipment when planning the project in the investment phase;
- development of control actions for maintenance and repair of equipment, as well as for the loading of equipment within the life cycle of the project during the operational phase.

*The strategies of situational management for the phases of the life cycle of the project:*

- include / not include the item under consideration in the list of project equipment in the investment phase;
- regulating time between overhaul (increase / decrease) and loading equipment (increase / decrease) during the operational phase.

*Situation characteristics: duration of the project, equipment status, planned equipment loading, actual equipment loading.*

*Parameters characterizing the forecasted state after the control action: at the investment phase (the level of risk of equipment failure, equipment maintenance costs, the amount of investment in the project), in the operational phase (the level of risk of equipment failure, the level of underutilization of equipment in the project cycle, equipment maintenance costs).*

*Target situations: implementation of the project by zones of acceptable risk or closure of the project.*

*In the developed fuzzy situation network three levels of hierarchy are distinguished: situational, network and factor.*

*The situation level in the project is formed by two classes of typical situations:*

- typical fuzzy situation in the state of equipment in the project;
- typical fuzzy situation in terms of production capacity of the project.

*The network level is developed on the basis of expert knowledge. Two networks have been developed. The first network reflects situations that depend on the initial state of equipment, wear and down time. The second network reflects the work of the repair services, the mode of operation of equipment and the speed at which production capacities are being developed.*

*The factor level characterizes the "failure rate curve of equipment" and "the life-cycle curve of the project".*

*Approbation of the method was carried out to assess the risk of equipment failure in the reconstruction project of one of the woodworking enterprises of the Orenburg region.*

**Keywords:** risk of equipment failure, fuzzy situation network, management strategy, management decisions

DOI: 10.17587/it.24.601-609



## References

1. **Alan Moran.** Risk management in Agile Projects, *ISACA Journal*, 2016, vol. 2, pp. 14–17, available at: <https://www.isaca.org/Journal/archives/2016/volume-2/Documents/Journal-volume-2-2016.pdf> (reference date: April 15, 18).
2. **Marian Andrei Gurau, LuciaVioleta Melnic.** Management of risk in industrial projects evaluation, *International Journal of Academic Research in Management (IJARM)*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 167–175, available at: <http://elvedit.com/journals/IJARM/wp-content/uploads/2014/03/Management-of-Risk-in-Industrial-Projects.pdf> (reference date: April 15, 18).
3. **Kornienko O. Y., Makarova V. A.** Actual issues of assessing the effectiveness of corporate law management: a monograph, Supplemented, St. Petersburg, Publishing house Polytechnic. University, 2015, 279 p., available at: <https://www.hse.ru/pubs/share/direct/document/175936493> (reference date: April 15, 18) (in Russian).
4. **Matveyev S.** "Territory" of controlling, *Enterprise Management*, 2013, no.8 (31), available at: [http://upr.ru/upload/iblock/c4a/Matveyev-\\_\\_\\_-0831\\_pBUX.pdf](http://upr.ru/upload/iblock/c4a/Matveyev-___-0831_pBUX.pdf) (date of access: 15.04.18) (in Russian).
5. **Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Doronin S. V.** Reliability, survivability and security of complex technical systems, *Computational Technologies*, 2009, vol. 14, no. 6, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/nadezhnost-zhivuchesti-i-bezopasnost-slozhnyh-technicheskikh-sistem> (reference date: April 15, 18) (in Russian).
6. **Thomas A. Carbone, Donald D. Tippett.** Project risk management using the project risk FMEA, *Engineering Management Journal*, 2004, vol. 16, pp. 28–35, available at: <http://www.tom-carbone.com/papers/Carbone-RFMEA-EMJDec04.pdf> (reference date: April 15, 18).
7. **OJSC "Systems and technologies for ensuring security."** System of methods for managing the safety of process equipment by the criteria of failure risk, Prospectus of results of development for the 15th anniversary of the organization of the enterprise. Orenburg, 2006, 44 p. (in Russian).
8. **Gorodetsky A. Ye., Tarasova I. L., Zinyakova V. Yu.** Combined logical-probabilistic and linguistic modeling of failures of complex systems, *Information-Control Systems*, 2015, no. 1, pp. 35–42, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/kombinirovannoe-logiko-veroyatnostnoe-i-lingvisticheskoe-modelirovanie-otkazov-slozhnyh-sistem> (date of access: 15.04.18) (in Russian).
8. **Gorodetsky A. Ye., Tarasova I. L., Zinyakova V. Yu.** Combined logical-probabilistic and linguistic modeling of failures of complex, *Information-Control Systems*, 2015, no. 1, pp. 35–42, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/kombinirovannoe-logiko-veroyatnostnoe-i-lingvisticheskoe-modelirovanie-otkazov-slozhnyh-sistem> (date of access: 15.04.18).
9. **Victorova V. S., Stepanyants A. S.** Models and methods for calculating the reliability of technical, Moscow, Publishing group URSS, LLC "LENAND", 2016, 256 p. (in Russian).
10. **Katz B. A., Antonenko I. N., Molchanov A. Yu.** Information systems for managing production assets. History, state and prospects, *Automation And New Technologists*, 2015, TPA 3 (78), available at: [http://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information\\_systems\\_asset\\_management.pdf](http://trim.ru/sites/default/files/files/pdf/information_systems_asset_management.pdf) (circulation date: April 15, 018).
11. **Karelin V. P.** Intellectual technologies and systems of artificial intelligence for decision support, *Bulletin of the Taganrog Institute of Management and Economics*, 2011, no. 2, pp. 79–84, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/intellektualnye-tehnologii-i-sistemy-iskusstvennogo-intellekta-dlya-podderzhki-prinyatiya-resheniy> (date of access: 15.04.18) (in Russian).
12. **Nedosekin A. O.** Application of the theory of fuzzy sets to the problems of financial management, *Audit and Financial Analysis*, 2000, no. 2, available at: <http://www.cfin.ru/press/afa/2000-2/08-2.shtml> (reference date: April 15, 018) (in Russian).
13. **Rusin A. Yu., Abdulhamed M., Baryshev Ya. V.** Algorithms of the automated control system for testing equipment for reliability, *Software Products and Systems*, 2016, no. 2 (114), available at: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=4143> (reference date: April 15, 018) (in Russian).
14. **Shakhanov V. I., Varfolomeev I. A., Ershov E. V., Yudin O. V.** Forecasting equipment failures in conditions of a small number of failures, *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2016, no. 6, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/prognozirovanie-otkazov-oborudovaniya-v-usloviyah-malogo-kolichestva-polomok> (date of circulation: 15.04.18).
15. **Menshikov V. I., Menshikova K. V.** Practical use of the method of situational management in management systems by safe operation, *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2004, vol. 7, no. 3, pp. 370–374 (in Russian).
16. **Borovsky A. S., Tarasov A. D.** Adoption of design solutions based on the models "Situation — control strategy-action" for the modernization of physical protection, *Infocommunication Technologies*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 60–67 (in Russian).
17. **Kruger L. S., Kvyatkovskaya I. Yu.** Formalization of typical situations in the tasks of managing the movement of public transport, *Nauch.-Tekhn. statements St. Petersburg. state. polytechnical. University*, 2012, no. 3 (150), pp. 106–110 (in Russian).
18. **Melikhov A. N., Bernshtein L. S., Korovin S. Ya.** Situational advisory systems with fuzzy logic, Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian).
19. **Gaibova T. V., Shumilina N. A.** Adaptive management of the process of developing design capacities taking into account the production risk of equipment failure, *Internet-journal "Naukovedenie"*, 2015, vol. 7, no. 3 (28), p. 96 (in Russian).
20. **Gaibova T. V., Shumilina N. A.** Formalization of the task of managing the design risk of equipment failure, *Scientific and Technical Herald of the Volga Region*, 2015, no. 2, pp. 90–93 (in Russian).
21. **Shumilina N. A., Arefieva A. V., Druzhyaev O. V.** Calculation and analytical work of expert groups (1-expert): application program, Certificate of state registration in the Register of Computer Programs (Rospatent) No. 2017663457. Declared 12.10.2017. Reported on 12/4/2017 (in Russian).
22. **Gaibova T. V., Shumilina N. A.** Estimation of the design risk of equipment failure based on the theory of fuzzy sets, *Intellect. Innovation. Investments*, 2013, no. 2, pp. 10–16 (in Russian).

**В. М. Гриняк**, д-р техн. наук, проф.,  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,  
**А. С. Девятисильный**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
**А. В. Шурыгин**, студент,  
Дальневосточный федеральный университет

### Оценка возможностей использования bluetooth-устройств для навигации внутри помещений<sup>1</sup>

*Статья посвящена проблеме навигации внутри помещений в условиях ограничений на спутниковые средства (GPS, Глонасс), связанных с плохим качеством или недоступностью их данных. Рассматривается задача оценки местоположения объекта по данным устройств типа Bluetooth, основанная на измерениях уровня сигнала, интерпретирующего дальность "объект—датчик". Предлагается ее модельная интерпретация в виде системы алгебраических линейных уравнений и решение, основанное на классическом методе наименьших квадратов. Такое представление позволяет строить априорные теоретические оценки погрешности определения координат и скоростей объекта. В работе приводятся данные расчетов характерной точности решения задачи в различных характерных ситуациях, а также подтверждающие их результаты натурных экспериментов.*

**Ключевые слова:** информационная система, навигация внутри помещений, маячная система, Bluetooth, координаты, скорость, метод наименьших квадратов

#### Введение

Задачи навигации — определения глобальных и относительных местных координат и их производных — являются важнейшим объектом приложения достижений информационных технологий. Еще два десятилетия назад они решались почти исключительно в специальных и отраслевых интересах (авиация, судоходство). После появления и массового вхождения в обиход современных мобильных устройств (в частности, смартфонов) произошел качественный скачок, и в настоящее время интерес к навигационным задачам имеется со стороны очень широкого круга бытовых потребителей.

Традиционные источники навигационных данных — спутниковые навигационные системы второго поколения (GPS, Глонасс) — позволяют очень точно определять местоположение в условиях наблюдения достаточного числа спутников, хорошего качества их сигнала и расположения объекта вблизи поверхности Земли. Эти

условия не всегда выполнимы внутри помещений, где число видимых спутников может быть ограничено, прием их данных может оказаться неустойчивым, а точность определения высоты объекта над поверхностью Земли — довольно низкой ("проблема этажа") [1]. В этом случае для определения местоположения объектов внутри помещения используются альтернативные источники навигационной информации: инерциальные навигационные средства (акселерометры, гироскопы), точки Wi-Fi-доступа в Интернет, устройства передачи данных Bluetooth, датчик давления, магнитометр и т. п. Их данные могут использоваться как по отдельности, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

К настоящему времени навигация внутри помещений оформилась в самостоятельный класс задач [2]. С точки зрения информационных технологий эти задачи носят комплексный характер. Во-первых, они требуют разработки особых математических моделей и алгоритмов фундаментального характера для обеспечения навигационной компоненты. Во-вторых, для их реализации в виде информационных сервисов необходима разработка программных

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ, проект 18-07-00132.

комплексов специальной архитектуры, учитывая особенности программно-аппаратных платформ мобильных устройств.

Несмотря на повышенный интерес к задаче навигации внутри помещений со стороны исследователей и ИТ-разработчиков, можно сказать, что к настоящему времени пока не выработаны стандартные методы ее решения, что создает перспективы для инноваций. Среди имеющихся наработок в области навигации внутри помещений можно отметить следующие хорошо зарекомендовавшие себя подходы.

◆ *Использование данных инерциальных датчиков.* В этом случае с помощью гироскопов и акселерометров мобильного устройства решается либо классическая задача инерциальной навигации, либо ее варианты, адаптированные к особенностям имеющихся датчиков и априорных данных о помещении и свойствах движения объекта [3–5]. Достоинством такого подхода является автономность и отсутствие привязки к внешней инфраструктуре. Вместе с тем устройствам бытового назначения инерциальные измерения доступны лишь с большой погрешностью, что не дает возможности решать задачу с приемлемой точностью. Это делает указанный подход практически полезным только для специальных устройств, оснащенных навигационными датчиками высокой точности.

◆ *Использование данных Wi-Fi/Bluetooth.* Первый способ использования таких данных — решение задачи типа трилатерации. В этом случае исходными данными для оценки координат наблюдаемого объекта служат измерения дальностей "объект—датчик", при этом дальность оценивается по уровню принимаемого мобильным устройством сигнала [6, 7]; такой способ аналогичен используемому, например, в гидроакустике [8–10]. Второй способ — определение местоположения объекта путем сравнения измеряемых уровней сигнала от окружающих датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (карта уровня сигналов, радиоотпечаток) [11–14]. К достоинствам подхода можно отнести возможность использования уже развернутых сетей передачи данных (Wi-Fi). Недостатками являются высокая погрешность измерения уровня сигнала, дискретность данных карт уровня сигналов, принципиально ограничивающая точность навигации, и необходимость предварительной калибровки и настройки (обучения) системы.

Имеются сведения о попытках разработки других подходов, например, системы оптического типа, когда сравниваются данные сканирова-

ния помещения и изображения с камеры смартфона [15], или системы, основанной на навигации по магнитному полю с помощью компаса смартфона [16]. Известны попытки комбинирования в одной системе позиционирования нескольких подходов одновременно [17–19].

Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth-устройств имеет целый ряд преимуществ. Во-первых, это построение инфраструктуры на базе недорогого и распространенного оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала. Во-вторых, возможность практически произвольного конфигурирования датчиков на стенах помещения в силу их малого размера и автономности (не нужно подводить электропитание), что дает возможность оптимизации условий наблюдения. В-третьих, дальность видимости Bluetooth-устройств невелика, а их сигнал практически не проходит сквозь капитальные стены, что полностью решает "проблему этажа".

В настоящей статье рассматривается модель задачи навигации внутри помещений по данным Bluetooth-устройств, основанная на измерениях уровня сигнала, интерпретирующего дальность "объект—датчик". Целью работы является оценка характерной точности определения координат объекта в различных типовых навигационных ситуациях и перспектив реализации подхода для тех или иных практических приложений.

### Основные модельные представления

Передаваемые Bluetooth-устройством данные содержат довольно емкую информацию о его работе [20]. С точки зрения обсуждаемой задачи наиболее важными элементами данных являются уникальный идентификатор наблюдаемого устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него сигнала (единицей измерения, используемой в смартфонах, обычно служит дБм). Уровень принимаемого сигнала связан с дальностью "объект—датчик" следующим известным соотношением [21]:

$$u = u_* - 10n \log_{10}(d/d_*).$$

Здесь  $u$  — уровень сигнала, принимаемого мобильным устройством (объектом) на расстоянии  $d$  от Bluetooth-устройства (датчика);  $u_*$  — уровень сигнала, измеренный на расстоянии  $d_*$  от устройства;  $n$  — коэффициент, учитывающий распространение сигнала в окружающей среде. Значения параметров  $d_*$  и  $u_*$  — калибровочные расстояние и уровень сигнала — являются техническими характеристиками конкретного устройства, значение коэффици-

ента затухания  $n$  также считается известным. В принципе, эти значения могут быть определены при калибровке устройства.

Введем правую ортогональную систему координат  $x, y$ , связанную с помещением. Пусть имеются  $N$  датчиков, "видимых" мобильным устройством. Дальность "объект—датчик" связана с координатами объекта и датчика следующим образом:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $x, y$  — координаты объекта;  $x_i, y_i$  — координаты  $i$ -го датчика.

Положим, что движение объекта описывается следующей кинематической моделью:

$$\begin{bmatrix} x(t_{k+1}) \\ v_x(t_{k+1}) \\ y(t_{k+1}) \\ v_y(t_{k+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_{k+1} - t_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_{k+1} - t_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_k) \\ v_x(t_k) \\ y(t_k) \\ v_y(t_k) \end{bmatrix},$$

или, в общем виде,

$$\mathbf{s}(t_{k+1}) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t_k). \quad (1)$$

Здесь  $x(t_k), y(t_k)$  — координаты объекта в момент времени  $t_k$ ;  $v_x(t_k), v_y(t_k)$  — компоненты вектора скорости объекта. Вектор  $\mathbf{s}(t_k)$  характеризует состояние системы в момент времени  $t_k$ .

С учетом вышесказанного уравнения измерений будут иметь следующий вид:

$$u_i(t_k) = u_{*i} - 10n \log_{10} \left( \sqrt{(x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2} / d_{*i} \right) + \eta_i(t_k), \quad (2)$$

где  $u_i(t_k)$  — уровень сигнала  $i$ -го датчика, принимаемого на объекте в момент времени  $t_k$ ;  $x_i, y_i$  — координаты  $i$ -го датчика;  $x(t_k), y(t_k)$  — координаты объекта в момент времени  $t_k$ ;  $u_{*i}$  и  $d_{*i}$  — калибровочные значения уровня сигнала и расстояния  $i$ -го датчика;  $\eta_i(t_k)$  — инструментальная погрешность измерения  $i$ -го датчика, отнесенная к моменту времени  $t_k$ ;  $k = \overline{1, M}$ ,  $M$  — число измерений от каждого датчика.

Таким образом, имеем модельную интерпретацию задачи навигации в виде "состояние—измерение" (1), (2). Методологически общим подходом к решению задач такого типа является их линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о векторе состояния системы, — в данном случае это предположения о координатах и скоростях объекта. Линеаризация уравнения (2) приводит его к виду

$$\begin{aligned} \delta u_i(t_k) &= \\ &= \frac{-10nd_{*i}(x(t_k) - x_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta x(t_k) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(y(t_k) - y_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta y(t_k) + \\ &+ \eta_i(t_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta x(t_k), \delta y(t_k)$  — погрешности априорных представлений о координатах объекта;  $\delta u_i(t_k)$  — невязка измерения.

Популярными методами решения задач типа (1), (3) являются динамические алгоритмы статистически оптимального оценивания, усваивающие измерения последовательно, по мере поступления данных (алгоритм Калмана, модальные алгоритмы [22, 23]). Особенности программной реализации рассматриваемой задачи с накоплением и совместной обработкой данных измерений за некоторый период времени делают возможным альтернативный подход — сведение ее к методу наименьших квадратов, в пользу которого и сделан выбор в настоящей работе.

Запишем уравнения (3) с учетом модели эволюции состояния системы (1):

$$\begin{aligned} \delta u_i(t_k) &= \frac{-10nd_{*i}(x(t_k) - x_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta x(t_*) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(x(t_k) - x_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} (t_k - t_*) \delta v_x(t_*) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(y(t_k) - y_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \delta y(t_*) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(y(t_k) - y_i)}{\ln 10((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2)} \times \\ &\times (t_k - t_*) \delta v_y(t_*) + \eta_i(t_k) \end{aligned}$$

или, в общем случае,

$$\delta \mathbf{Z} = \mathbf{H} \delta \mathbf{s}(t_*) + \boldsymbol{\xi}. \quad (4)$$

Здесь  $\delta \mathbf{Z}$  — полный вектор (длины  $MN$ ) невязок измерений на интервале наблюдения;  $\delta \mathbf{s}(t_*)$  — вектор погрешностей априорных представлений о состоянии системы (координатах и скоростях объекта) в выбранный момент времени  $t_*$ ;  $\mathbf{H}$  — матрица коэффициентов;  $\boldsymbol{\xi}$  — вектор приведенных погрешностей измерений. Целью решения задачи (4) является оценка вектора  $\mathbf{s}(t_*)$  по имеющимся измерениям уровней сигнала  $u_i(t_k)$ . Эта оценка может быть выполнена, например, путем сведения задачи к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \delta \mathbf{Z} = \mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H} \delta \mathbf{s}(t_*) \quad (5)$$

и ее решения известными способами. Здесь  $\mathbf{Q} = \text{mean}[\xi\xi^T]$  — ковариационная матрица случайного вектора  $\xi$ , она определяется свойствами инструментальных погрешностей измерений  $\eta_i(t_k)$  и считается известной. Матрица  $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$  определяет при этом дисперсию погрешности оценки вектора состояния  $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$ , так что  $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$ ;  $\text{mean}$  — оператор математического ожидания.

В рассматриваемой задаче матрица  $\mathbf{D}$  довольно точно описывает вероятностные свойства как ее линейризованного варианта (1), (3), так и основного, исходно нелинейного (1), (2). Как показывают приведенные ниже результаты исследования, значения соответствующих коэффициентов матрицы  $\mathbf{D}$  вполне позволяют оценить характерную точность определения координат объекта при различных конфигурациях системы датчиков, используемых для навигации внутри помещения.

### Результаты численного моделирования

Численное исследование задачи проводили для следующих значений параметров: инструментальная погрешность измерений датчиков имеет нормальное распределение с дисперсией  $25 \text{ (дБм)}^2$ ; частота обновления данных об уровне сигнала равна  $0,07 \text{ с}$ , что характерно для современных смартфонов; число измерений  $M$  от каждого датчика равно  $28$ , что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно  $2 \text{ с}$ .

На рис. 1 и 2 показано моделируемое расположение датчиков; имитируются следующие типичные ситуации: коридор шириной  $3 \text{ м}$  (рис. 1) и холл или комната размером  $10 \times 10 \text{ м}$  (рис. 2).

Датчики "наклеены" на стены в различных конфигурациях: с одной стороны коридора (рис. 1, а, б), с двух сторон коридора (рис. 1, в), в углах комнаты (рис. 2, а), в углах и на стенах комнаты (рис. 2, б). При этом считается, что датчики расположены в одной плоскости с движущимся объектом (или достаточно близко к этой плоскости), что дает возможность ограничиться только двумерным вариантом модели рассматриваемой задачи.

Будем рассматривать два варианта вектора состояния  $\mathbf{s}(t_k)$ : с компонентами, включающими координаты и скорости объекта (кинематическая задача), и с компонентами, включающими только координаты (статическая задача).

На рис. 3, а показаны вычисленные согласно (5) значения средней погрешности оценивания координат объекта  $\sigma_{xy}$  в кинематической задаче:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{D_{xx} + D_{yy}},$$

где  $D_{xx}$  и  $D_{yy}$  — соответствующие диагональные коэффициенты матрицы  $\mathbf{D}$ ; моделируется, что объект находится (движется) по середине коридора (см. рис. 1). На рис. 3 сплошная линия соответствует конфигурации датчиков, показанной на рис. 1, в, штриховая линия — на рис. 1, б, пунктирная линия — на рис. 1, а. Видно, что конфигурация системы датчиков и их расположение относительно объекта существенно влияет на погрешность оценивания. Так, при нахождении объекта дальше  $7 \text{ м}$  от

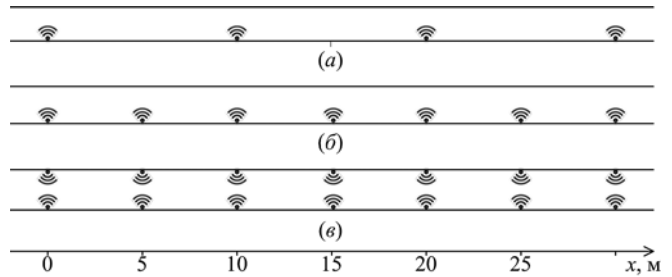


Рис. 1. Варианты расположения датчиков в помещении типа "коридор"

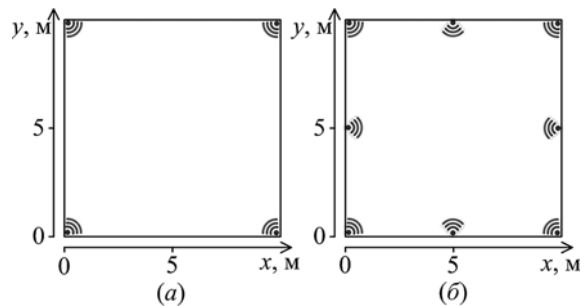


Рис. 2. Варианты расположения датчиков в помещении типа "холл" или "комната"

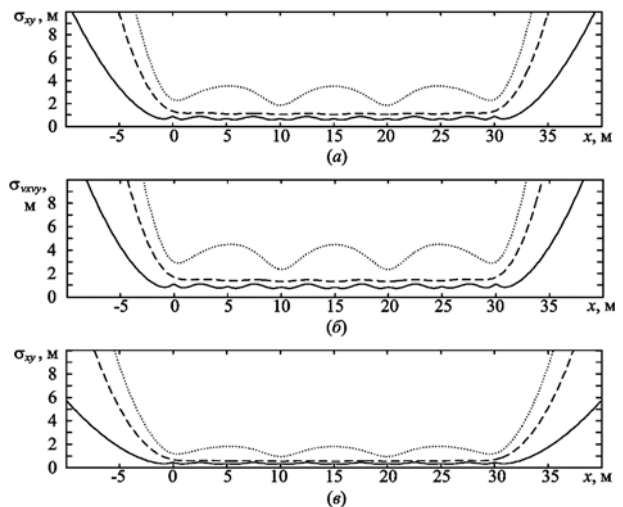


Рис. 3. Погрешность определения координат и скоростей объекта в помещении типа "коридор":

а и б — погрешность определения координат и скоростей в кинематической задаче; в — погрешность определения координат в статической задаче

системы датчиков (области графика  $x < -7$  и  $x > 37$ ) значение  $\sigma_{xy}$  становится неприемлемым во всех случаях (более 5 м). Если объект находится "внутри" системы датчиков (область графика  $0 < x < 30$ ), значение  $\sigma_{xy}$  составляет от 1 (в случае, если датчики расположены на расстоянии 5 м друг от друга) до 3,5 м (если датчики расположены на расстоянии 10 м друг от друга). Расположение датчиков с двух сторон также улучшает условия наблюдения.

На рис. 3, б показаны значения средней погрешности оценивания скоростей объекта  $\sigma_{v_x v_y}$  в кинематической задаче:

$$\sigma_{v_x v_y} = \sqrt{D_{v_x v_x} + D_{v_y v_y}},$$

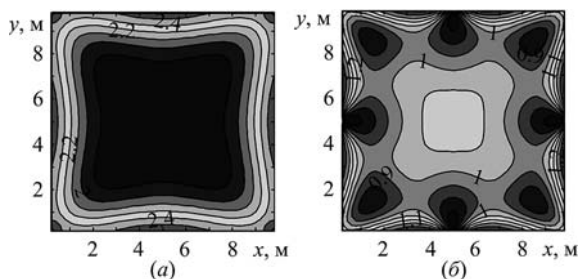


Рис. 4. Погрешность определения координат в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта: а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а); б — случай восьми маяков

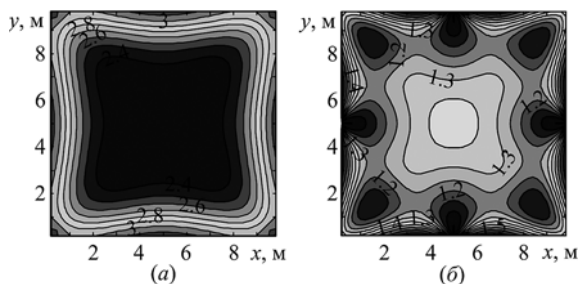


Рис. 5. Погрешность определения скорости в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта: а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а); б — случай восьми маяков

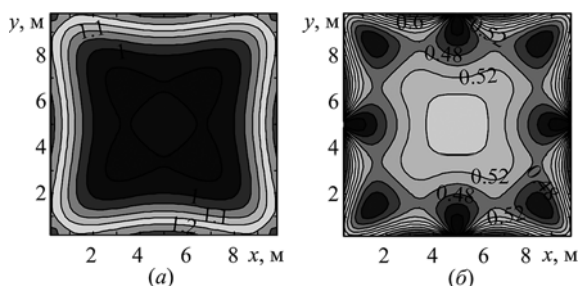


Рис. 6. Погрешность определения координат в помещении типа "комната" при оценке только координат объекта: а — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а); б — случай восьми маяков

где  $D_{v_x v_x}$  и  $D_{v_y v_y}$  — соответствующие диагональные коэффициенты матрицы  $\mathbf{D}$ ; объект также движется по середине коридора. Величина  $\sigma_{v_x v_y}$  принимает значения от 1 до 4 м/с.

На рис. 3, в показаны значения средней погрешности оценивания координат объекта  $\sigma_{xy}$  в статической задаче при нахождении объекта в коридоре. Видно, что при нахождении объекта "внутри" системы датчиков значение  $\sigma_{xy}$  составляет от 0,5 до 2 м, что, как и ожидалось, существенно лучше, чем в кинематической задаче (рис. 3, а).

На рис. 4 показаны вычисленные согласно (5) значения средней погрешности оценивания координат объекта  $\sigma_{xy}$  в кинематической задаче при нахождении (движении) объекта в комнате (см. рис. 2). При этом рис. 4, а соответствует конфигурации датчиков рис. 2, а, а рис. 4, б — конфигурации рис. 2, б. Величина  $\sigma_{xy}$  принимает значения от 1,9 до 2,5 м для случая четырех датчиков и от 0,9 до 1,2 м для случая с восемью датчиками.

Аналогичные данные приведены на рис. 5: показаны средние погрешности оценивания скоростей объекта  $\sigma_{v_x v_y}$  в кинематической задаче. На рис. 6 показаны значения величины  $\sigma_{xy}$  в статической задаче. В последнем случае они примерно в два раза меньше, чем в кинематической задаче.

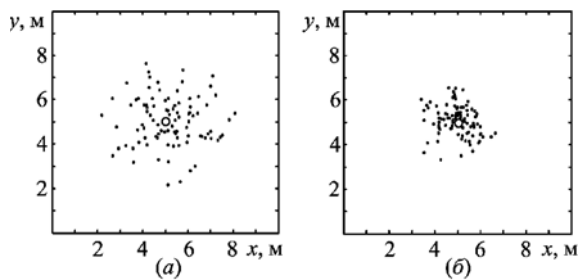
В целом ожидаемую погрешность оценивания координат следует признать приемлемой для большого числа практических приложений, погрешность же оценивания скорости (рис. 3, б и рис. 5) довольно велика.

## Результаты натурального эксперимента

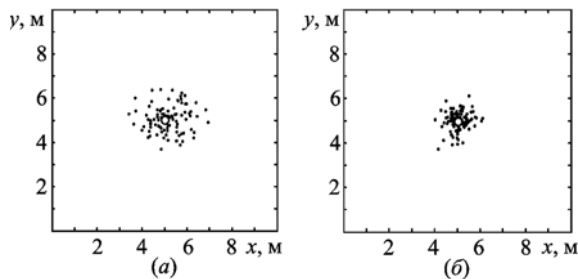
При проведении натуральных исследований использовали Bluetooth-маяки SKYLAB Beacon VG01 [24] и мобильный телефон Samsung Galaxy S8 на платформе Android. На рис. 7 показан результат оценки координат объекта в помещении типа "комната" при решении кинематической задачи. Точками показаны оценки местоположения объекта (100 точек — 100 последовательных решений задачи), при этом объект находился в середине комнаты (выколотый кружок). Рис. 7, а соответствует случаю четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, а), рис. 7, б — случаю восьми маяков (см. рис. 2, б).

На рис. 8 показан аналогичный результат оценки координат объекта при решении статической задачи.

Из результатов проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что погрешность оценки координат объекта в натурном эксперименте



**Рис. 7. Результаты оценки координат объекта в помещении типа "комната" при оценке координат и скоростей объекта:**  
*a* — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, *a*);  
*б* — случай восьми маяков



**Рис. 8. Результаты оценки координат объекта в помещении типа "комната" при оценке только координат объекта:**  
*a* — случай четырех маяков по углам комнаты (см. рис. 2, *a*);  
*б* — случай восьми маяков

полностью соответствует предсказанной на основании расчетов. Для этого достаточно соотнести данные рис. 5 и 7 и рис. 6 и 8; видно, что погрешность оценки координат укладывается в круг с радиусом  $2\sigma_{xy}$ . Таким образом, теоретические данные о средней погрешности оценивания координат и скоростей объекта, полученные для линеаризованной задачи (из уравнения (5)), достаточно близки к реальным свойствам исходной задачи (1), (2), что подтверждает возможность их использования для анализа разрешимости при проектировании навигационной системы рассматриваемого типа.

### Обсуждение

Данные расчетов и натурных экспериментов показывают, что характер навигационных измерений, доступных для устройств типа Bluetooth, дает возможность качественного решения задачи наблюдения на характерных расстояниях "объект—датчик", не превышающих 5...7 м. При этом важны также условия наблюдения — взаимное расположение датчиков и объекта; наилучший результат обеспечивается в том случае, если датчики располагаются, как бы "окружая" объект.

Точность решения статической задачи существенно выше (примерно в 2 раза), чем кинематической. Вместе с тем игнорирование

в модели задачи скорости объекта при его реальном движении приводит к ее неудовлетворительному решению. Поэтому при разработке приложения, осуществляющего навигацию мобильного устройства, следует обязательно реализовать идентификацию модели движения. Для покоящихся на интервале наблюдения объектов нужно ограничиваться статической моделью задачи, а для движущихся использовать кинематическую модель. Создавая приложение, необходимо также учитывать ресурсоемкость операции чтения данных навигационных датчиков, при этом желательна, насколько это возможно, высокая частота обновления данных их внутреннего буфера.

Общей проблемой всех задач, решаемых методом линеаризации около опорного решения является локальность оценок их свойств. Проведенные натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче свойства линеаризованной модели достаточно хорошо описывают исходную (нелинейную) задачу.

Построение навигационной системы рассматриваемого типа всегда связано с калибровкой датчиков и их привязкой к местной локальной системе координат (выставкой системы). Такая привязка может быть осуществлена различными известными способами, в том числе описанными в работах авторов, опубликованных ранее [25, 26].

### Заключение

Результаты настоящего исследования позволяют оптимистично оценить возможность построения навигационной системы на основе Bluetooth-маяков с использованием классических модельных представлений маячных дальномерных систем. При характерном расстоянии 5 м между маяками и объектом реально достижимая точность определения координат объекта составляет 1...2 м, что достаточно для традиционных задач навигации внутри зданий (построение пути, контекстная реклама). Дальнейшее повышение точности навигации может быть связано с уменьшением случайной компоненты инструментальных ошибок измерений путем идентификации модели сигнала и применения различных алгоритмов фильтрации, чему авторы планируют посвятить отдельное исследование. Представляется, что улучшение точности навигации до значений порядка 0,5 м позволит качественно расширить возможный круг решаемых задач (навигация автономных робототехнических устройств, идентификация аномалий движения в потоке людей и т. п.).

## Список литературы

1. **Шебшаевич В. С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
2. **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation.** URL: <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
3. **Дэвидсон П., Киркко-Яаккола М., Коллин Ю. З., Такала Я.** Навигационный алгоритм с использованием планов зданий и данных автономных датчиков // Гироскопия и навигация. 2015. № 1. С. 29–42.
4. **Кроненветт Н., Руппельт Я., Троммер Г. Ф.** Прецизионное позиционирование пешехода в помещении на основе контроля за стадиями его походки // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 33–48.
5. **Емельянец Г. И., Степанов А. П., Блажнов Б. А.** О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиорентриров // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 3–17.
6. **Щекотов М. С., Кашевник А. М.** Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 459–471.
7. **Namiot D.** On indoor positioning // International Journal of Open Information Technologies. 2015. N. 3. P. 23–26.
8. **Матвиенко Ю. В., Ваулин Ю. В., Каморный А. В.** Градуировка навигационных средств подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1. С. 16–22.
9. **Васильев К. К., Бобков А. В.** Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 12. С. 11–14.
10. **Мартынюк М. В., Генералов А. В., Наумов С. С., Залетнов С. Е., Дмитриев Д. В., Тимофеева О. П.** Разработка системы локального акустического позиционирования на базе персонального компьютера // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 68–71.
11. **Воронов Р. В., Мошевикин А. П.** Применение условной энтропии при формировании рекомендаций по размещению базовых станций в локальных системах позиционирования // Информационные технологии. 2014. № 10. С. 11–16.
12. **Мурашко И. А., Храбров Д. Е.** Методика локального позиционирования на основании Wi-Fi-сети университета // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, Вылічальная тэхніка і кіраванне. 2015. № 2. С. 119–127.
13. **Воронов Р. В., Малодушев С. В.** Динамическое создание карт уровня Wi-Fi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. 2014. № 1. С. 80–92.
14. **Ассур О. С., Филаретов Г. Ф.** Разработка комплексного метода позиционирования объектов по данным беспроводных сетей Wi-Fi и устройств BLE (Bluetooth Low Energy) // Известия Института инженерной физики. 2015. № 2. С. 2–10.
15. **Yang S. H., Jeong E. M., Kim D. R., Kim H. S., Son Y. H., Han S. K.** Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication // Electronics Letters. 2013. N. 49 (1). P. 54–56.
16. **Magnetic field anomalies.** URL: <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (01.04.2018).
17. **Петрова О. А., Табушник Г. В., Ван Мероде Д.** Метод определения текущего расположения в системах позиционирования и навигации внутри помещения // Электротехнические и компьютерные системы. 2017. № 25. С. 270–278.
18. **Овсянников А. А., Новиков П. А.** Модели реализации навигации внутри помещения при помощи анализа беспроводных источников данных // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. № 4. С. 37–51.
19. **Retscher G.** Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator // Journal of Navigation. 2007. Vol. 60, N. 1. P. 107–117.
20. **Протоколы. Bluetooth.** URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (01.04.2018).
21. **Motley A. J., Keenan J. M. P.** Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electronics Letters. 1988. Vol. 24, N. 12. P. 763–764.
22. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2010. 509 с.
23. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2012. 417 с.
24. **Skylab.** Beacon virgo|beacon for indoor position. URL: <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (01.04.2018).
25. **Grinyak V. M., Devyatisil'nyy A. S.** Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // Journal of Computer and Systems Sciences International. 1999. Vol. 38, N. 1. P. 124–130.
26. **Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Иваненко Ю. С.** Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 3. С. 12.

**V. M. Grinyak**, Ph. D. (Tech.), Professor,

Vladivostok State University of Economics and Service,

**A. S. Devyatisilny**, Ph. D. (Tech.), Chief Researcher,

Institute of Automation and Control Processes, FEBRAS, Vladivostok, Russian Federation,

**A. V. Shurygin**, student,

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

## Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons

*The paper is devoted to research of possibility to use Bluetooth devices for indoors navigation. Relying on alternative measurements such as Wi-Fi network, onboard accelerometers, Bluetooth devices are vastly used to solve positioning and navigation problems when there are limitations to use global positioning satellite systems (such as GPS). Recently the indoors navigation became an important research problem with subset of developed math models and the implementation hardware. Even though there is a lot of interest in the solution of the problem, there are still no standard approach. Due to the accuracy limitations of the broadly available mobile devices applying inertial navigation approach would dramatically reduce variety of the hardware it could be used. Relying on available Wi-Fi networks for evaluation of navigation parameters also has accuracy limitations. However, using Bluetooth signal considered as way more prospective for solving navigation problems. Due to the small size, relatively low prices of Bluetooth transmitters and signal features (indoors walls and bulkheads are not transparent) it is possible to deploy special indoors infrastructure for navigation purposes. At this paper there is a common model definition for the object movement at the superposition field of set of "visible" Bluetooth transmitter signals. For solutions authors relay on linear approximation with applying Kalman's algorithm and least*



squares method. The research includes numerical experiment results for defined set of physical parameters of the system such as an error of evaluation of signal level, signal sampling frequency typical for modern smartphones. There are results of 2D navigation modeling for 2 types of indoor geometry (big square room and long narrow corridor) with different configurations of navigation system (location of Bluetooth transmitters on the walls). The research covers 2 main problems: static and kinematic. Identified significant dependency from navigation network configuration on the accuracy of location and velocity evaluation. Numerical experiment shows that the evaluation error of kinematic problem is about twice bigger than it is for static problem. The paper also presents results of real experiments for static and kinematic problems with using SKYLAB Bacon VG01 Bluetooth transmitters and smartphone Samsung Galaxy S8. Real experiments confirmed that math model with linear approximation defined by authors is usable for solving indoors navigation problems using Bluetooth signal. The paper concludes that nature of the measurement available for Bluetooth signals is applicable for indoors accurate enough navigation for typical distances "object-beacon" in the range not more than 5-7 meters.

**Keywords:** information system, indoor navigation, beacons, Bluetooth, position, velocity, least squares method

DOI: 10.17587/it.24.610-617

## References

1. Shebshaevich V. S. *Setevye sputnikovye radionavigacionnyye sistemy* (Network satellite radio navigation systems), Moscow, Radio i svyaz', 1993, 408 p. (in Russian).
2. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, available at: <http://ipin-conference.org/> (01.04.2018).
3. Davidson P., Kirkko-Jaakkola M., Collin J., Takala J. Navigacionnyj algoritm s ispol'zovaniem planov zdaniy i dannyh avtonomnyh datchikov (Navigation Algorithm Combining Building Plans with Autonomous Sensor Data), *Gyroscopy and Navigation*, 2015, is.3, pp. 188–196 (in Russian).
4. Kronenwett N., Ruppelt J., Trommer G. F. Motion Monitoring based on a Finite State Machine for Precise Indoor Localization, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, is.3, pp. 190–199.
5. Emel'yantsev G. I., Stepanov A. P., Blazhnov B. A. O reshenii navigacionnoj zadachi dlja letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem inercial'nogo modulja na mikromehaničeskikh datchikah i nazemnyh radioorientirov (Solution of Aircraft Navigation Problem using MEMS IMU and Ground Radio Sources), *Gyroscopy and Navigation (Giroskopija i navigacija)*, 2017, no. 1, pp. 3–17 (in Russian).
6. Shchekotov M., Kashevnik A. Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones, *Proc. FRUCT Conf.*, 2012, pp. 43–48.
7. Namiot D. On indoor positioning, *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, no. 3, pp. 23–26.
8. Matvienko Yu. V., Vaulin Yu. V., Kamornyy A. V. Graduirovka navigacionnyh sredstv podvodnyh robotov (Calibration for Underwater Robotic Vehicle's Navigation), *Podvodnye Issledovaniya i Robototekhnika*, 2015, no. 1, pp. 16–22 (in Russian).
9. Vasiliev K. K., Bobkov A. V. Dinamicheskoe ispol'zovanie orientirov dlja ocenki koordinat avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov (Dynamic use landmarks for coordinates estimation), *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Sistemy*, 2017, no. 12, pp. 11–14 (in Russian).
10. Martynyuk M. V., Generalov A. V., Naumov S. S., Zaitnov S. E., Dmitriev D. V., Timofeeva O. P. Development of A System Of Local Acoustic Positioning Based On A Personal Computer, *Measurement Techniques*, 2016, no. 10, pp. 1179–1184.
11. Voronov R. V., Moschevikin A. P. Primenenie uslovnoj jentropii pri formirovanii rekomendacij po razmeshheniju bazovyh stancij v lokal'nyh sistemah pozicionirovaniya (Use of Conditional Entropy for Optimal Disposition of Base Stations in Local Positioning Systems), *Information Technologies*, 2014, no. 10, pp. 11–16 (in Russian).
12. Murashko I. A., Khrabrov D. E. Metodika lokal'nogo pozicionirovaniya na osnovanii Wi-Fi-seti universiteta (Methods of local positioning based on Wi-Fi-network of university), *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhaj'naga y'niversitjeta imja Janki Kupaly. Seryja 2: Matjematyka. Fizika. nfarmatyka, Vylichal'naja tjehnika i kiravanje*, 2015, no. 2, pp. 119–127 (in Russian).
13. Voronov R. V., Malodushev S. V. Dinamicheskoe sozdanie kart urovnja Wifi-signalov dlja sistem lokal'nogo pozicionirovaniya (Dynamic Creation Of Wi-Fi-Signal Level Maps For Location Systems), *Systems and Means of Informatics*, 2014, no.1, pp. 80–92 (in Russian).
14. Assur O. S., Filaretov G. F. Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovaniya ob#ektov po dannyh besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv BLE (Bluetooth Low Energy), *Izvestija Instituta Inzhenernoj Fiziki*, 2015, no. 2, pp. 2–10 (in Russian).
15. Yang S. H., Jeong E. M., Kim D. R., Kim H. S., Son Y. H., Han S. K. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication, *Electronics Letters*, 2013, no. 49 (1), pp. 54–56.
16. Magnetic field anomalies, available at: <http://www.gizmag.com/magnetic-anomaly-indoor-positioning/23253/> (date of access 01.04.2018).
17. Petrova O., Tabunshchik G., Van Merode D. Metod opredelenija tekushhego raspolozhenija v sistemah pozicionirovaniya i navigacii vnutri pomeshhenija (Method for Location Detection in Indoor Navigation Systems), *Jelektrotehnicheskie i Komp'juternye Sistemy*, 2017, no. 25, pp. 270–278 (in Russian).
18. Ovsyannikov A. A., Novikov P. A. Modeli realizacii navigacii vnutri pomeshhenija pri pomoshhi analiza besprovodnyh istočnikov dannyh (Implementation of the indoor navigation algorithm based on Bluetooth Low Energy 4.0. technology), *Komp'juternye Instrumenty v Obrazovanii*, 2015, no. 4, pp. 37–51 (in Russian).
19. Retscher G. Test and Integration of Location Sensors for a Multi-Sensor Personal Navigator, *Journal of Navigation*, 2007, vol. 60, no.1, pp. 107–117.
20. Bluetooth, available at: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/Wireless/bluetooth/7.htm> (date of access 01.04.2018).
21. Motley A. J., Keenan J. M. P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz, *Electronics Letters*, 1988, vol. 24, no. 12, p. 763–764.
22. Stepanov O. A. Osnovy teorii ocenivaniya s prilozhenijami k zadacham obrabotki navigacionnoj informacii. Chast' 1. Vvedenie v teoriju ocenivaniya (Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 1. Introduction to the theory of estimation), SPb., GNC RF OAO "Koncern "CNII "Jelektropribor", 2010, 509 p. (in Russian).
23. Stepanov O. A. Osnovy teorii ocenivaniya s prilozhenijami k zadacham obrabotki navigacionnoj informacii. Chast' 2. Vvedenie v teoriju fil'tracii (Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information. Part 2. Introduction to the theory of filtration), SPb., GNC RF OAO "Koncern "CNII "Jelektropribor", 2012, 417 p. (in Russian).
24. Skylab Beacon virgo|beacon for indoor position, available at: <http://www.skylabmodule.com/beacon-virgo/> (date of access 01.04.2018).
25. Grinyak V. M., Devyatil'snyj A. S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1999, vol. 38, no. 1, pp. 124–130 (in Russian).
26. Grinyak V. M., Grynyak T. M., Ivanenko Y. Dinamicheskaja vystavka mnogopozicionnoj sistemy nabljudenija (Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System), *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*, 2017, no. 3, pp. 12.

Ю. В. Доронина, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры, e-mail: juvado@yandex.ru,  
Севастопольский государственный университет

## Метод структурно-функционального синтеза информационной системы с учетом нечеткой привязки функций

*Рассматривается задача реализации распределенной функциональности информационной системы. Прimenяется идея нечеткой привязки функций к формированию плана решения задачи, требующей определенных ресурсов (функций или сервисов структурных единиц) системы. Приведен пример распределения функций для системы мониторинга окружающей среды.*

**Ключевые слова:** информационная система, функциональная привязка, структурный синтез, привязка функций, сервисы структурной единицы, расщепление задач

### Введение

При проектировании новых информационных систем (ИС) или реорганизации существующих важной проблемой является повышение их надежности и гибкости функционирования без значительного привлечения ресурсов. Гибкость в данном контексте обеспечивает возможность реализации требуемого сервиса при решении некоторой задачи на существующих или незначительно расширенных ресурсах. В этой связи задача структурного синтеза ИС остается актуальной.

Синтез сложной системы должен учитывать два аспекта: функциональную привязку функций (как сервиса) к структурным элементам системы и неопределенность в функционально-структурных составляющих в течение цикла функционирования этой системы. Функциональная привязка означает, что существует базовая связь между элементами системы и функциями, присущими этим элементам. Вместе с тем возможны локальные изменения привязок функций к структурным элементам при определенных условиях [1, 2]. Противоречивость этих двух аспектов может быть решена за счет выделения устойчивых (базовых) структурных элементов с четкой привязкой функций, а также подмножества структурных элементов с ограниченной функциональной привязкой.

Следует отметить, что академик РАН Н. П. Бехтерева в своих исследованиях мозга человека подтвердила выдвинутые ею же положения о практическом отсутствии четкой привязки функции к определенному участку мозга (структурной компоненте). При этом было выявлено, что центры организации определенной

деятельности могут переноситься из одного полушария в другое [3]. На основании, в том числе, идеи выдающегося физиолога ставится задача синтеза сложной информационной системы с учетом выдвинутых положений о нечеткости распределенной функциональности ее элементов, что может служить важным фактором самоорганизации ИС.

### Постановка задачи

Пусть  $f_i$  — функция (сервис), которая должна быть реализована некоторой ИС,  $i = \overline{1, I}$ , где  $I$  — конечное число функций ИС;  $F$  — конечное множество функций ИС;  $S$  — множество структурных единиц ИС, где  $s_j$  — структурный элемент ИС,  $j = \overline{1, J}$ ,  $J$  — конечное число структурных элементов ИС.

Обозначим значимые подмножества множества  $F = \{F_{if}, F_f\}$ , где  $F_{if}$  (*inflexible*) — подмножество функций, жестко привязанных к структурным единицам ИС,  $F_f$  (*flexible*) — подмножество гибких функций, не привязанных к структурным единицам ИС. Примерами  $F_{if}$  функций могут быть функции, закрепленные за конкретным участком программного кода, что подразумевает их привязку к конкретной структурной единице ИС. Функция контроля данных, напротив, может быть реализована в различных подсистемах: подсистеме сбора данных, подсистеме их анализа или хранения, что дает возможность определить ее как  $F_{if}$ . Функция принятия решения, например, может быть только в соответствующей подсистеме и в общем случае определяется как  $F_f$ .

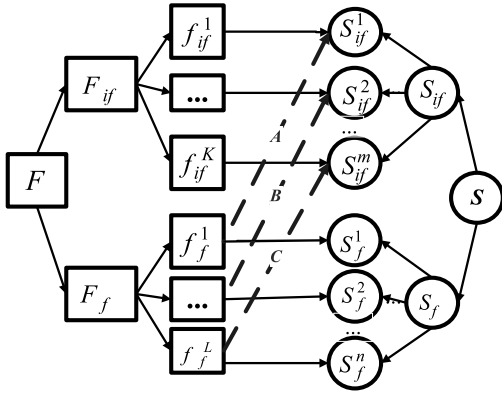


Рис. 1. Возможные сочетания подмножеств в структуре ИС

На рис. 1 показаны предполагаемые сочетания подмножеств в структуре ИС, штриховые линии  $A$ ,  $B$  и  $C$  отражают возможные связи гибких функций и жестко функционально-ориентированных элементов ИС.

Задача состоит в том, чтобы для заданной системы определить подмножества функций, жестко привязанных к структурным единицам ИС, и гибких функций, а также построить возможные реализации структур в зависимости от различных требований к этой системе.

### Метод структурно-функционального синтеза с учетом нечеткой привязки функций

Уточнение постановки задачи формализации структурного синтеза системы с учетом нечеткой привязки функций обеспечивается следующими ограничениями:

— функция может быть реализована не на любом структурном элементе, а только на элементе, принадлежащем к определенному классу

$$F_f \rightarrow \{s_f^1, s_f^2, \dots, s_f^k\}, \quad s_f^i \in S_f, \quad i = \overline{1, N};$$

— задача  $z_l$ , связанная с реализацией некоторой функции или группы функций, должна принадлежать к области реализуемых задач из числа  $L$

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_l\}, \quad z \in Z, \quad l \subseteq L.$$

Реализация некоторой задачи  $z_l$  может потребовать от системы участия ее определенных структурных компонент, поэтому для упрощения формализации обозначим подмножество этих структурных элементов следующим образом:

$$S_z \rightarrow \{s_z^1, s_z^2, \dots, s_z^k\}, \quad z \in Z.$$

На рис. 2,  $a$ , показано структурно-функциональное многообразие ИС при решении некоторой задачи  $A$  из множества  $Z$ . Таким образом, как можно видеть на рис. 2,  $a$ , имеется несколько

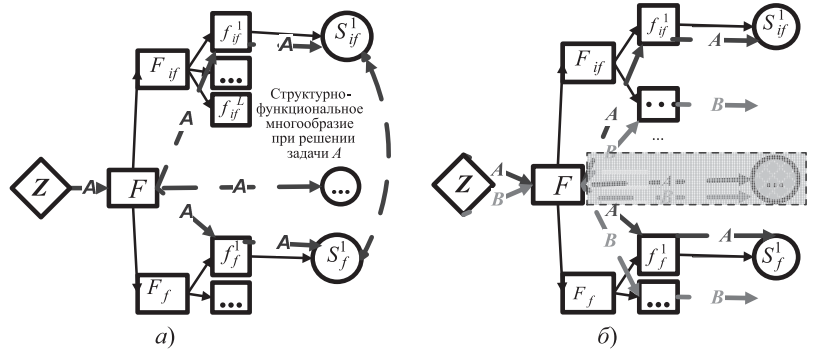


Рис. 2. Структурно-функциональное многообразие ИС:

$a$  — при решении некоторой задачи  $A$ ;  $b$  — возможное пересечение структурно-функциональных компонент при решении нескольких задач

ко возможностей реализации задачи  $A$  из множества структурно-функционального многообразия решения задачи  $Z$ . Для реализации задачи  $B$  может оказаться, что некоторые возможности реализации задач  $A$  и  $B$  совпадают. При этом функциональная неопределенность может быть причиной неопределенности управления этим процессом, а также служить фактором неэффективной загрузки структурных элементов.

Следовательно, возникает проблема выбора такой возможности (пути решения или выбора структурного элемента) как ресурса для решения некоторой задачи. Целесообразно учитывать следующие факторы:

1) важность задачи из множества (показатель важности должен находиться в некотором заданном диапазоне) в целях определения приоритетных задач и путей их решения;

2) возможности структурной единицы (учет того, какие типы функций системы: стационарные или гибкие  $F_{if}$ ,  $F_f$  могут обеспечивать эти структурные единицы) в рамках учета важности задачи;

3) наличие ресурса времени, т. е. возможность ожидания выполнения или реализации функции в рамках текущей задачи и выбранной структурной единицы;

4) планирование и прогноз распределения функций и занятости структурных единиц.

Для учета этих факторов необходимо ввести показатель важности задачи относительно всего множества задач  $Z$ :

$$Z = \{z_i | h_j\}, \quad z_i \in Z, \quad h_j \in H, \quad H = [h_1 \dots h_5], \quad (1)$$

где  $z_i$  — текущая задача;  $h_j$  — оценка важности текущей задачи  $z_i$  по шкале Харрингтона в диапазоне значений  $H = [h_1, \dots, h_5]$ . В качестве примера вербально числовой шкалы, имеющей достаточно широкое применение, используется шкала Харрингтона ( $H$ ), характеризующая степень выраженности критериального свойства и имеющая универсальный характер (табл. 1) [4].

Таблица 1

Шкала Харрингтона

Индекс	Содержательное описание градаций	Числовое значение
$h_1$	Очень высокая	0,80...1,00
$h_2$	Высокая	0,64...0,80
$h_3$	Средняя	0,37...0,64
$h_4$	Низкая	0,20...0,37
$h_5$	Очень низкая	0,00...0,20

Определение соответствия задачи и структурной единицы, на которой предполагается ее реализация, относительно дифференцирования требуемых функций (сервисов) реализовано на основе метода расщепления задач (МРЗ). Схематично МРЗ представлен на рис. 3 согласно методологии описания потоков работ WFD [5].

Под расщеплением задачи понимается ее декомпозиция на подзадачи, которые могут быть оценены по границам шкалы интервалов. При этом в отличие от декомпозиции задачи при ее расщеплении образуется не более двух-трех составляющих.

Ниже сформулированы шаги (I—III) метода расщепления задач в целях определения по-

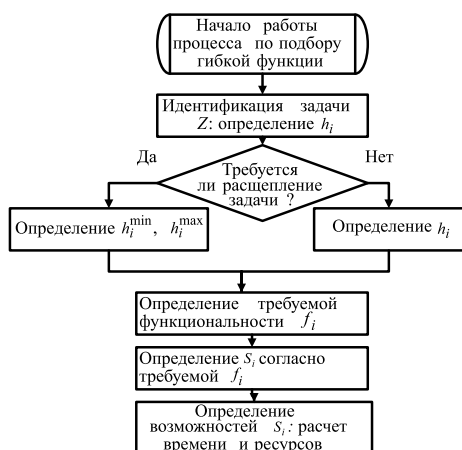


Рис. 3. Метод расщепления задач для определения структурного элемента реализации заданной функциональности в нотации WFD



Рис. 4. Пример расщепления задач на основе методологии IDEF0

рядка реализации их на структурных единицах с учетом привязки функций.

I. Все задачи классифицируются по важности на основе шкалы Харрингтона с учетом (1).

Пример: система организационного управления (ОргУ) предприятием.  $Z = \{z_Z$  — управление производственным процессом |  $h_2, z_2$  — управление персоналом |  $h_2, z_3$  — обеспечение поддержки рабочего процесса |  $h_3$  }.

Примечание:  $h_2$  и  $h_3$  выбраны в качестве оценок важности задач исходя из предметной области приведенного примера ОргУ экспертным путем.

II. Каждая классифицированная задача  $z_i$  ставится в соответствие диапазону числовых значений  $h_j$ . Пример:

$$Z = \{ \lfloor z_1^{\min} | h_2^{\min}, z_1^{\max} | h_2^{\max} \rfloor; \lfloor z_2^{\min} | h_2^{\min}, z_2^{\max} | h_2^{\max} \rfloor; \lfloor z_3^{\min} | h_3^{\min}, z_3^{\max} | h_3^{\max} \rfloor \},$$

где  $h_2^{\min} = 0,64, h_2^{\max} = 0,80, h_3^{\min} = 0,37, h_3^{\max} = 0,64$ .

III. Проводится идентификация расщепленных задач с учетом приоритетов шкалы Харрингтона. Пример:  $z_1^{\min}$  — управление значимой частью производственного процесса;  $z_1^{\max}$  — управление всем производственным процессом;  $z_2^{\min}$  — управление персоналом, формирующим основные решения и процессы производства;  $z_2^{\max}$  — управление всем персоналом.

Следует отметить, что расщепление задач не во всех случаях представляет собой тривиальный процесс, но его реализация может быть осуществлена, например, на основе функционально-процессного моделирования в стандартах IDEF1 или IDEF3 (диаграммами (Process Flow Description Diagrams, PFDD или Object State Transition Network, OSTN) [6]. На рис. 4 показан обобщенный вид декомпозиции (расщепления) задач для примера ОргУ предприятием, реализованный на Ramus Educational — бесплатном аналоге Ramus [7]. Ramus Education может быть использован для создания диаграмм в формате IDEF0 и DFD.

После определения приоритетности и расщепления задач реализуется фактор 2: анализ возможностей структурной единицы. В этой связи предлагается определять не только тип структурной единицы  $F_{if}, F_j$  но и ее состояние посредством введения коэффициента состояния структурной единицы  $k_v, k_r \in R$  (относительно процесса устаревания этой структурной единицы).

Наличие ресурса времени (фактор 3) целесообразно вводить для определения остаточного времени при приближении состояния структурной единицы к критическому значению ее коэффициента в связи с устареванием. Этот показатель может играть существенную роль при

прогнозировании применимости структурной единицы с нечеткой привязкой функций. На этапе создания (проектирования) ИС текущее время  $t$  системы считается меньшим времени  $t_m$  начала морального устаревания этой системы:  $t < t_m$ . Предполагается, что на этапе функционирования ИС текущее время  $t_m < t < t_{kr}$ , где  $t_{kr}$  — критическое время, после которого система окончательно устаревает и не может продолжать эксплуатацию. В работе [8] показано, что при линейном возрастании эксплуатационных расходов  $t_{kr}$  может быть определено как

$$t_{kr} = \sqrt{\frac{2C_0}{\alpha C_1}}, \quad (2)$$

где  $C_1$  — стоимость эксплуатации системы;  $\alpha$  — регулярный прирост эксплуатационных расходов;  $C_0$  — приведенные к началу эксплуатации расходы на разработку, производство, установку системы.

Таким образом, выражение (1) может быть расширено с учетом приведенных факторов:

$$\begin{aligned} Z &= \{z_i | h_j, r_k\}, z_i \in Z, h_j \in H, \\ H &= [h_1 \dots h_5], r_k \in Res, i, j \in N, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $r_k$  — требуемый ресурс для решения задачи из заданного множества ресурсов  $Res$ .

Для структурной единицы имеем:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow \{s_i | \{f_{if}, f_f\}, z_i | h_j, or_{s_i}\}; z_i \in Z_{s_i}; \\ h_j &\in H; or_{s_i} \in Res; i, j \in N, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $or$  — остаточный ресурс, который может быть использован задачей  $z_i$  из заданного множества ресурсов  $Res$  в единицах времени

$$or = t_{kr} - t = \sqrt{\frac{2C_0}{\alpha C_1}} - t; \{f_{if}, f_f\} — \text{множество функций, реализуемых структурной единицей } s_i.$$

Под структурной компоновкой понимается структурная единица с несколькими функциями (сервисами). Вариант структурной компоновки описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} s_i &= \{z_i | h_j, r_k\}, z_i \in Z, h_j \in H, \\ H &= [h_1 \dots h_5], r_k \in Res, i, j \in N. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом дополнительных ограничений (временных ограничений различных типов) при расщеплении задач получены два основных случая определения структурных единиц для реализации требуемой функциональности:

$$\begin{aligned} s_i^+ \langle F_0^{S_i} \rangle &= \{z_i | h_j, r_k\} \prod_{i=0}^L \{z_i | h_j, r_k\}, z_i \in Z, \\ h_j &\in H, H = [h_1 \dots h_5], r_k \in Res, i, j \in N, \end{aligned}$$

(случай 1)

$$s_i^+ \langle F_{\max}^{S_i} \rangle = \begin{cases} \langle F_{\max}^{S_i} \rangle - \langle z_i | h_j^{\tau}(t), r_k \rangle, z_i \in Z, \\ h_j^{\tau}(t) : h_j \in H, t \leq T^{\tau}, r_k \in Res, i, j \in N; \\ \langle F_{\max}^{S_i} \rangle - \langle z_i | h_j^{\tau\tau}(t), r_k \rangle, z_i \in Z, \\ h_j^{\tau\tau}(t) : h_j \in H, t \in \overline{T_1^{\tau} : T_2^{\tau}}; \\ \langle F_{\max}^{S_i} \rangle - \langle z_i | h_j, r_k, [z_k^p] \rangle, z_i \in Z, \\ h_j = h_j^{\max}, p \in Y^{S_i}, \end{cases}$$

(случай 2)

где  $h_j^{\tau}(t)$  — оценка важности текущей задачи  $z_i$  по шкале Харрингтона с учетом ограничения по времени, когда требуемая функциональность актуальна в течение времени, не больше, чем  $T^{\tau}$  (для случая 2);  $h_j^{\tau\tau}(t)$  — оценка важности текущей задачи  $z_i$  с учетом ограничения по времени, когда требуемая функциональность актуальна в течение диапазона времени  $t \in \overline{T_1^{\tau} : T_2^{\tau}}$  (для случая 2);  $Y$  — число подсистем в системе  $S$  — возрастает.

### Пример реализации предложенных решений

Поскольку на рис. 3 приведен тривиальный пример, иллюстрирующий суть расщепления задач и способ его отображения на основе стандарта IDEF0, далее будет показан более сложный пример. Предложенный подход применен для решения задачи генерации вариантов метеорологической системы (МС) со структурной динамикой. МС структурно состоит из нескольких подсистем; за исходный вариант структурной компоновки  $s_0$  берется вариант с базовой функциональной нагрузкой  $f_{if}$ , кроме того, определен максимум функциональности структурной единицы  $f_{if}^{\max}$ . Особенности рассматриваемой МС: 1) наличие заданной заказчиком исходной формы представления данных: библиотека электронных таблиц (которая должна существовать в системе некоторое время до полной модернизации и внедрения новых стандартов электронного хранения); 2) необходимость формировать заданные виды анализа данных: за 1 год наблюдений, за период 5, 10 лет и за период 30 лет (стандартный анализ); 3) необходимость периодического (нестандартного анализа) за любой требуемый временной период; 4) наличие возможности фильтрации данных по некоторому заданному принципу; 5) наличие возможности формирования гибкого (настраиваемого) интерфейса для реализации текущих требований заказчика. Приведенный список требований (особенностей) явился отправной точкой для

Таблица 2

Фрагмент матрицы образов вариантов подсистемы хранения данных

Признак	$PS_1$	$PS_2$	$PS_3$	$PS_4$	$PS_5$	$PS_6$	$PS_7$
Наличие библиотеки электронных таблиц (БЭТ)	1	1	1	1	1	1	1
Наличие базы данных (БД)	0	0	0	1	1	1	1
Наличие функции формирования запросов к БД на основе специальных интерфейсов, в том числе {Н} — возможность формирования специальных научных обзоров З (БД{Н})	0	0	0	0	0	1	0
Наличие функции фильтрации данных (Ф)	0	0	0	1	1	1	1
АФ — анализ при фильтрации данных   анализ без фильтрации (АФ А)	0	1	0 1	0	1	0	1

применения предложенного метода расщепления функций и гибкого распределения между структурными единицами.

Матрица образов для морфологического анализа представлена в табл. 2.

Обозначения вида 0|1 в табл. 2 имеют смысл такой, что при *декомпозиции или реструктуризации* возможно остаточное наличие признака. Например, в случае структурной декомпозиции на основе расщепления из подсистемы может быть выделена определенная функция, частично сохранившись в исходной структурной единице (см. рис. 4). Эта ситуация характерна для реинжиниринга существующей ИС, когда развитие системы реализуется в процессе ее функционирования и некоторые функции

продолжают быть прикрепленными к определенным структурным единицам еще некоторое время после построения новой реструктурированной компоновки системы [9, 10].

Морфологическая таблица сформированных вариантов подсистемы хранения данных в МС, построенная с учетом случаев 1 и 2, представлена в табл. 3.

На рис. 5, 6 показаны наиболее интересные из полученных в процессе структурно-функционального синтеза вариантов:  $F_2^{S_1}$  — декомпозиция с расщеплением функции  $A_4^*$ : расщепление функции формирования запросов к БД (реализация научных и стандартных обзоров) (рис. 5) и  $F_1^{S_1}$  — функциональная реструктуризация, когда часть функций переходит в другую структурную единицу:  $A_5^*$  — анализ при фильтрации данных с расщеплением функции фильтрации данных (рис. 6).

Реализация распределения функций по структурным компонентам, приведенная выше, осуществлена без учета ресурсов (фактор 3). С учетом количественных оценок ресурсов, требуемых при гибком распределении задач,

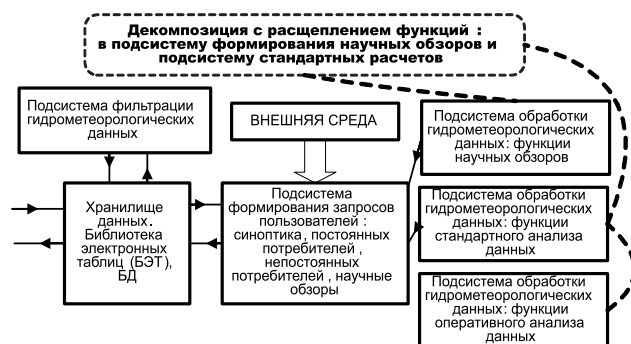


Рис. 5. Вариант МС с расщеплением функций при декомпозиции структурных единиц

Таблица 3

Морфологическая таблица структурных компоновок подсистемы хранения данных в МС (фрагмент)

Возможные варианты функциональности	Наименование функционального блока	Особенности сгенерированного варианта
$F_0^{S_1} = \{A_1, A_2\}$	$A_1$ — хранилище данных в форме библиотеки электронных таблиц; $A_2$ — блок формирования запросов в библиотеке электронных таблиц	Начальный базовый вариант
$F_{max}^{S_1} = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\} = \{F_0^{S_1}, A_3, A_4, A_5, A_6\}$	$A_3$ — хранилище данных в форме БД; $A_4$ — блок формирования запросов к БД (интерфейс); $A_5$ — анализ при фильтрации данных; $A_6$ — сжатие данных	Вариант с максимальной функциональностью
$F_1^{S_1} = \{A_1, A_2, A_5\} = \{F_0^{S_1}, A_5^*\}$	$A_5^*$ — анализ при фильтрации данных с расщеплением функции фильтрации данных (реализация интеллектуального анализа данных и фильтра для хранения сжатых данных)	Реструктуризация анализа на основе гибкой функции
$F_2^{S_1} = \{A_1, A_2, A_3, A_4\} = \{F_0^{S_1}, A_3, A_4^*\}$	$A_4^*$ — расщепление функции формирования запросов к БД (реализация научных и стандартных обзоров)	Декомпозиция функций интерфейса на основе гибкой функции
$F_3^{S_1} = \{A_1, A_2, A_3, A_6\} = \{F_0^{S_1}, A_3, A_6\}$	Базовый вариант с возможностью сжатия данных и хранилищем в БД	Без расщепления

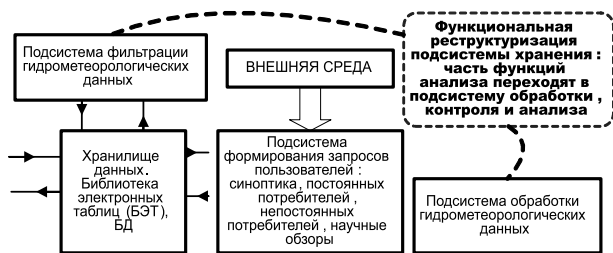


Рис. 6. Вариант МС с расщеплением функций при функциональной реструктуризации

уточним решение. В примере получены два расщепления:  $A_5^*$  — анализ при фильтрации данных с расщеплением функции фильтрации данных (реализация интеллектуального анализа данных —  $[z_1^{\max}|h_2^{\max}]$  и фильтра для хранения сжатых данных —  $[z_1^{\min}|h_2^{\min}]$ ),  $A_4^*$  — расщепление функции формирования запросов к БД (реализация научных —  $[z_2^{\max}|h_3^{\max}]$  и стандартных обзоров —  $[z_2^{\min}|h_3^{\min}]$ ) с учетом того, что  $h_2^{\min} = 0,64$ ,  $h_2^{\max} = 0,80$ ,  $h_3^{\min} = 0,37$ ,  $h_3^{\max} = 0,64$  (табл. 3).

Таким образом, задачи имеют следующие описания:

$$\begin{aligned} z_1 &= \{z_1^{\min}|0,64, z_1^{\max}|0,80, r_1 = 12\}; \\ z_2 &= \{z_2^{\min}|0,37, z_2^{\max}|0,64, r_2 = 8\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $r_1, r_2$  равны соответственно 12 и 8 ч от рабочего процесса. Указанные в описаниях (6) временные ресурсы обусловлены тем, что фильтрация данных может быть осуществлена в течение не более чем за 12 ч от принятых МС данных мониторинга за это время, а формирование обзоров имеет возможный ресурс в течение рабочего дня (для других предметных областей следует рассмотреть особенности конкретных процессов):

$$s_1 \rightarrow \{s_1\{f_{if}, f_f\}, z_1^{\min}|0,64, or_{s_1} = 12\}; \quad (7)$$

$$s_1\{f_{if}, f_f\}, z_1^{\max}|0,80, or_{s_1} = 4\}; \rightarrow s_2\{f_f\}:A_5^*};$$

$$s_1 \rightarrow \{s_1\{f_{if}, f_f\}, z_2^{\min}|0,37, or_{s_1} = 4\};$$

$$s_1\{f_{if}, f_f\}, z_2^{\max}|0,64, or_{s_1} = 4\}; \rightarrow \quad (8)$$

$$\rightarrow s_3\{f_f\}, s_4\{f_f\}:A_4^*}.$$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что в первом случае, когда решается задача с расщеплением при совпадении требуемого  $r_1$  и имеющегося  $or_{s_1}$  ресурса, реализована операция реструктуризации анализа на основе гибкой функции, когда часть функций переходит в другую структурную единицу.

Во втором случае (8) имеется полное несовпадение  $r_1$  и  $or_{s_1}$ , в связи с чем применена операция декомпозиции, когда требуемая функция распределена по другим структурным единицам  $s_3, s_4$ .

В целях упрощения описания метода в работе не описан анализ остаточного ресурса на основе выражения (2), где применяется идея о текущем устаревании структурных единиц систем. При этом  $or_{s_1}$  находится по прогнозной кривой, отражающей закон устаревания системы (в большинстве случаев принимается предположение об экспоненциальном законе распределения).

## Заключение и направления дальнейших исследований

Таким образом, в процессе генерации вариантов в рамках структурно-функционального синтеза использовались принципы *функциональной декомпозиции и функциональной реструктуризации*, что означает разбиение подсистем на две или более с разделением функций либо перенос функций из одной подсистемы в другую в рамках технологии гибкой функциональности. Учет этих особенностей в процессе генерации вариантов структурных компонент дал возможность построить и формализовать метод, который может быть использован в случае трудноформализуемых предметных областей, а также при построении систем с требованием дальнейшего развития на основе варьирования функциональности структурных единиц системы с нечеткой привязкой функций.

Предложенные принципы решения задач структурно-функционального синтеза с учетом нечеткой привязки функций, основанные на методе расщепления задач с учетом их значимости и ресурса структурных единиц, позволили реализовать элементы самоорганизации сложных систем.

## Список литературы

1. Павлов А. Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. № 28. С. 143–168.
2. Потрясаев С. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга // Труды СПИИРАН. 2013. № 28. С. 82–106.
3. Бехтерева Н. Магия мозга и лабиринты жизни. СПб.: Нотабене, 1999. 134 с.
4. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте. // Современные проблемы науки и образования. URL: <http://www.science-education.ru/100-5270>.
5. Построение диаграмм потоков работ — WFD. URL: <http://studopedia.info/2-82371.html>.
6. IDEF3 Process Description Capture Method report. URL: <http://www.staratel.com/iso/IDEF/IDEF3/Idef3.pdf> (дата обращения 22.01.2018).

7. **Проект Ramus.** Официальный русскоязычный сайт. URL: <http://ramus-educational.software.informer.com/> (дата обращения 22.01.2018).

8. **Киселев О. И.** Метод определения предельно допустимых временных параметров жизненного цикла РЭС // Радиотехника. 1997. № 5. С. 64—67.

9. **Доронина Ю. В.** Реинжиниринг мониторинговых информационных систем циклического типа // Східно-європейський журнал передових технологій. Харків, 2012. 1/2 (55). С. 12—14.

10. **Доронина Ю. В., Рябовая В. О.** Метод модернизации информационных систем экологического мониторинга на основе анализа их функциональной нагрузки // Труды СПИИРАН. 2016. № 1 (44). С. 133—153.

**Yu. V. Doronina, Ph. D., Associate Prof., Professor, e-mail: juvao@yandex.ru, Sevastopol state University**

## Method of Structural-Functional Synthesis Information System Taking into Account the Fuzzy Binding Functions

*The synthesis of a complex system should take into account two aspects: the functional binding of functions to the structural elements of the system and the uncertainty in the functional — structural components during the cycle of operation of this system. Functional binding means that there is a basic relationship between the system elements and the functions inherent in those elements. However, local changes of function bindings to structural elements are possible under certain conditions. The inconsistency of these two aspects can be solved by selecting stable (basic) structural elements with a clear binding of functions, as well as a subset of structural elements with a limited functional binding. The article discusses the task of implementing distributed functionality of the information system. It applied the idea of fuzzy binding functions to the formation of a plan to deal with tasks that require certain resources (functions or services of structural units) of the system. An example of the distribution of functions for the environmental monitoring system is given.*

**Keywords:** information system, functional binding, structural synthesis, binding functions, services of units structural, splitting of tasks

DOI: 10.17587/it.24.618-624

### References

1. **Pavlov A. N.** Kompleksnoe modelirovanie strukturno-funkcional'noj rekonfiguracii slozhnyh ob'ektov (*Integrated modelling of the structural and functional reconfiguration of complex objects*), *Trudy SPIIRAN*, 2013, no. 28, pp. 143—168 (in Russian).

2. **Potrjasaev S. A., Sokolov B. V., Jusupov R. M.** Soderzhatel'noe i formal'noe opisanie problemy strukturno-funkcional'nogo sinteza i upravlenija razvitiem informacionnoj sistemy nazemno-kosmicheskogo monitoringa (*Conceptual and formal description of structure-functional synthesis and development control problems of space and ground based data monitoring information systems*), *Trudy SPIIRAN*, 2013, no. 28, pp. 82—106 (in Russian).

3. **Behтерева N.** Magija mozga i labirinty zhizni (*Magic brain and labyrinths of life*), SPb., Notabene, 1999. 134 p. (in Russian).

4. **Prakticheskie** aspekty ispol'zovanija funkcionii zhelatel'nosti v mediko-biologicheskom jeksperimente, *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, available at: <http://www.science-education.ru/100-5270> (in Russian).

5. **Postroenie** diagramm potokov rabot — WFD, available at: <http://studopedia.info/2-82371.html> (in Russian).

6. **IDEF3** Process Description Capture Method report, available at: <http://www.staratel.com/iso/IDEF/IDEF3/Idef3.pdf> (access date: 22.01.2018).

7. **Проект Ramus.** Oficial'nyj russkojazychnyj sajt, available at: <http://ramus-educational.software.informer.com/> (access date: 22.01.2018) (in Russian).

8. **Kiselev O. I.** Metod opredelenija predel'no dopustimyh vremennyh parametrov zhiznennogo cikla RJeS (*Method of determination of maximum permissible time parameters of life cycle of radio-electronic systems (RES)*), *Radiotekhnika*, 1997, no. 5, pp. 64—67 (in Russian).

9. **Doronina Ju. V.** Reinzhiniring monitoringovyh informacionnyh sistem ciklicheseskogo tipa (*Reengineering of the monitoring information systems of the cyclic type*), *Shidno-evropejs'kij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2012, 1/2 (55), pp. 12—14 (in Russian).

10. **Doronina Ju. V., Rjabovaja V. O.** Metod modernizacii informacionnyh sistem jekologicheskogo monitoringa na osnove analiza ih funkcional'noj nagruzki (*Method of upgrading information systems for environmental monitoring based on the analysis of their functional load*), *Trudy SPIIRAN*, 2016, no. 1 (44), pp. 133—153 (in Russian).

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор *Е. В. Конова.*

Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 10.07.2018. Подписано в печать 25.08.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ918. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.