

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 23

2017

№ 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Савченко В. В., Акатьев Д. Ю. Информационная технология психокоррекции эмоционального состояния пользователя на основе его устного чтения . . . 771

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Волосатова Т. М., Воронина П. А., Козарь А. А. Имитационное моделирование угроз информационной безопасности систем модульной авионики 776

Третьяков Р. В., Димов Э. М., Маслов О. Н., Халимов Р. Р. Совершенствование управления процессом разработки программного обеспечения на основе математических моделей и технологии имитационного моделирования . 782

Светушков Н. Н. Интегральное описание процесса теплопередачи для численного моделирования высокоскоростной закалки прокатных валков 790

Гридин В. Н., Рыжов Н. Г., Анисимов В. И., Абухазим М. М. Методы повышения эффективности процессов моделирования динамических режимов нелинейных систем 796

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Терехин А. В. Алгоритм вычисления инвариантных признаков невыпуклых изображений проекций произвольно расположенных трехмерных объектов 803

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Михеева Т. И., Федосеев А. А., Михеев С. В., Головин О. К. Метод синтеза тематического слоя объектов транспортной сети на основе материалов космической съемки 808

Беляков С. Л., Белякова М. Л., Савельева М. Н. Интеллектуальное управление диалогом при визуальном анализе сложных карт и схем 817

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Левин В. И. Моделирование и количественная оценка эффективности научных исследований 826

Кряжев С. А., Кузнецова Е. В., Макаров Е. Н. Управление портфелем ИТ-проектов как инструмент реализации ИТ-стратегии 833

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.
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.
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.
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.
ПОЛЕЩУК 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.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
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. 23
2017
No. 11

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Savchenko V. V., Akatyev D. Yu.** Information Technology of Psychocorrection of an User Emotional State Based on his Oral Reading 771

MODELING AND OPTIMIZATION

- Volosatova T. M., Voronina P. A., Kozar A. A.** Simulation Modeling of Information Security Threats Systems Modular Avionics 776
- Tretyakov R. V., Dimov Je. M., Maslov O. N., Khalimov R. R.** Software Development Process Management Improvement Based on Mathematical Models and Simulation Modeling Technology 782
- Svetushkov N. N.** Integral Description of the Heat Transfer Process for Numerical Modeling High-Speed Hardening of Rolling Rolls 790
- Gridin V. N., Ryzhov N. G., Anisimov V. I., Abukhazim M. M.** Methods to Boost Performance Modeling of Dynamic Modes of Nonlinear Systems 796

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Terekhin A. V.** The Algorithm for Calculation of the Invariant Features of Non-Convex Image Projections of Randomly Located Three-Dimensional Objects 803

GEOINFORMATION SYSTEMS

- Mikheeva T. I., Fedoseev A. A., Mikheev S. V., Golovnin O. K.** Method of Transport Net Thematic Layer Synthesis via Remotely Sensed Imagery 808
- Belyakov S. L., Belyakova M. L., Savelyeva M. N.** Intelligent Control of the Dialogue in the Visual Analysis of Complex Maps and Schemes 817

APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Levin V. I.** Modeling and Quantitative Estimation of Efficiency of Scientific Research 826
- Kryazhev S. A., Kuznetsova E. V., Makarov E. N.** IT-Portfolio Management as a Tool of IT Strategy Implementation 833

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.
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.
Zagidullin R. Sh., Cand. Sci. (Tech.), Ass. 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.
Martynov 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.
Grigorin-Ryabova E. V.
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"

В. В. Савченко, д-р техн. наук, проф., e-mail: svv@lunn.ru,
Д. Ю. Акатьев, канд. техн. наук, доц., e-mail: akatjev@lunn.ru,
Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н. А. Добролюбова,
г. Нижний Новгород

Информационная технология психокоррекции эмоционального состояния пользователя на основе его устного чтения

С использованием универсального теоретико-информационного подхода в метрике Кульбака—Лейблера ставится и решается задача разработки и исследования новой информационной технологии психокоррекции эмоционального состояния пользователя по данным фонетического анализа его устной речи во время чтения. Рассмотрено необходимое программное обеспечение, поставлен и проведен натурный эксперимент. Показано, что основным преимуществом новой технологии по сравнению с ее аналогами является оперативность процедуры при сохранении абсолютной приватности.

Ключевые слова: речь, анализ речи, речевой сигнал, речевые информационные технологии, проблема малых выборок, теоретико-информационный подход

Введение

Специалистам хорошо известно [1–3] о существовании жесткой взаимозависимости между акустическим (фонетическим) качеством устной речи диктора и его текущим эмоциональным состоянием. В нормальном состоянии человек говорит внятно, разборчиво и в узнаваемом для окружающих ключе. Фонетическое качество его речи в таком случае находится на достаточно высоком уровне. Однако в результате волнений, стрессов или снижения концентрации внимания на тексте его эмоциональное состояние ухудшается, а речь мгновенно утрачивает свои свойства. Поэтому, измеряя в текущем времени фонетическое качество речи некоторой личности, мы опосредованно получаем ценную информацию в отношении ее текущего эмоционального состояния в целях, если требуется, его коррекции тем или иным способом. В этом состоит известная [2, 3] задача психологической диагностики личности по голосу. Ее актуальность для самых разных сфер человеческой деятельности, включая область автоматической обработки речи [3, 4], представляется очевидной.

Серьезным препятствием для эффективного решения подобных задач до настоящего времени являлась проблема малых выборок наблюдений [5]. В программном комплексе "Voice Self-Analysis" [6] (в переводе на русский язык "речевой самоанализ" — см. по ссылке в Интернет <http://www.dictionary.com/browse/self-analysis>) она в значительной мере преодолена за счет использования универсального теоретико-информационного подхода [7] в метрике

Кульбака—Лейблера [8]. Это новейшая версия информационной системы [9]. Ее главное преимущество состоит в повышенной помехоустойчивости [10], а также в уникальной способности ее пользователя к самостоятельной корректировке своего текущего эмоционального состояния по данным фонетического анализа его устной речи. Разработке и исследованию новой информационной технологии на базе авторского программного обеспечения "Voice Self-Analysis" и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи

Современные методы фонетического анализа речи основываются [9, 10] на последовательном членении речевого сигнала на короткие (10...15 мс) сегменты (n -векторы) данных $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ длиной в одну минимальную (не членимую далее) речевую единицу (МРЕ) и на их последующем сопоставлении по тонкой структуре, в частности в спектральном представлении [5], с существующими эталонами. При этом главной проблемой здесь является выбор и обоснование множества фонетических эталонов $\{x_r^*\}$.

Известно [11], что любой диктор в силу ряда причин, например из-за особенностей своей речи или слуха, в принципе не в состоянии в процессе речеобразования точно воспроизвести эталон той или иной (r -й) МРЕ. Выходом из этой ситуации может служить задание каждой МРЕ не одним, а одновременно несколькими допустимыми вариантами $x_{r,j}, j = \overline{1, J_r}$, где $r = \overline{1, R}$, а R — объем фонетической базы данных. В таком случае диктору

будет достаточно приблизить свое произношение к любому из них, чтобы быть правильно понятым гипотетическим наблюдателем или слушателем. Этим существенно ослабляется проблема вариативности устной речи [3—5]: каждый конкретный диктор в процессе своего речеобразования выбирает для себя наиболее удобный и достижимый вариант эталонного произношения МРЕ. Одновременно становится понятным и собственно критерий качества формируемого (на выходе речевого тракта диктора) речевого сигнала по отношению к эталону: он должен войти в границы J_r -множества вариантов рассматриваемой МРЕ X_r как полноправный, $(J_r + 1)$ -й его элемент. В таком случае задача переходит в сугубо предметную плоскость: сначала по каждой из R МРЕ требуется сформировать множество (кластер) ее допустимых образцов — на этапе обучения диктора. И после этого в процессе речеобразования тестировать текущий сигнал \mathbf{x} согласно правилу близости общего вида

$$J_r^{-1} \sum_{j=1}^{J_r} \rho(\mathbf{x}/\mathbf{x}_{r,j}) \leq \rho_0 \quad (1)$$

в некоторой метрике $\rho(\mathbf{x}/\mathbf{x}_{r,j})$. При достаточной степени малости порогового уровня ρ_0 и при выполнении требования (1) качество речи диктора на фонетическом уровне можно оценить как достаточно высокое. И, наоборот, при нарушении данного требования соответствующая (текущая) МРЕ должна быть забракована наблюдателем как ошибка речеобразования.

Отметим важную отличительную особенность правила (1): в каждый момент времени решение может быть либо принято в пользу одной, двух, а вообще говоря, и нескольких МРЕ из используемой диктором фонетической базы данных $\{X_r\}$, либо вообще не принято — для сигналов \mathbf{x} нечеткой (маргинальной) структуры. И это точно соответствует теории и практике речеобразования [1, 2]: здесь не исключаются сбои и, как их результат, брак.

В вычислительном отношении проще, однако, задаться аналогичным (1) ограничением [3, 4]

$$\rho_r(\mathbf{x}) \leq \rho_0 \quad (2)$$

на расстояние от сигнала \mathbf{x} до "центра массы" рассматриваемого кластера:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_r^* &= \mathbf{x}_{r,v} : J_r^{-1} \sum_{j=1}^{J_r} \rho(\mathbf{x}_{r,j}/\mathbf{x}_{r,v}) = \\ &= \min_{i \leq J_r} J_r^{-1} \sum_{j=1}^{J_r} \rho(\mathbf{x}_{r,j}/\mathbf{x}_{r,i}) \triangleq \rho_r^* \end{aligned} \quad (3)$$

(символом \triangleq обозначено равенство по определению).

В режиме реального времени (в процессе восприятия речи) вместо $J_r \gg 1$ расстояний из (1) здесь вычисляется только одно расстояние $\rho_r(\mathbf{x}) \triangleq \rho(\mathbf{x}/\mathbf{x}_r^*)$ в пределах кластера X_r : от \mathbf{x} до его центра \mathbf{x}_r^* . Указанный центр — это обобщенный эталон данного

кластера, или эталон соответствующей фонемы. А множество всех таких эталонов $\{\mathbf{x}_r^*\}$ — экономный способ задания фонетической базы данных конкретной личности. В информационной теории [4] в роли расстояний между аллофонами в соотношении (3) используется величина информационного рассогласования по Кульбаку—Лейблеру, которая, как известно [9—11], наилучшим образом сочетается с нормативными аудиторскими оценками фонетического качества речи (ФКР).

Нетрудно заметить, что в рамках рассматриваемой модели (2) ФКР в количественном отношении может быть охарактеризовано величиной ρ_r^* из правой части выражения (3). При ее увеличении в процессе речеобразования можно говорить об ухудшении ФКР за счет увеличения вариативности МРЕ в речи диктора. При уменьшении ρ_r^* фонетическое качество, напротив, улучшается — за счет повышения степени однородности речевых единиц в пределах одного речевого потока.

Таким образом, в форме выражения (3) определяется информационный критерий ФКР по конечному набору образцов r -й МРЕ или по конечному фрагменту речевого сигнала. Его условная геометрическая интерпретация представлена на рис. 1, где точками на плоскости изображены элементы r -го фонетического кластера X_r , а линиями со стрелками — направленное "расстояние" Кульбака—Лейблера $\rho_r(\mathbf{x})$ от его информационного центра до каждого отдельного образца. Величина ρ_r^* — это средний радиус фонетического кластера, который используется в данном случае для оценки вариативности одноименной МРЕ.

Практическая реализация информационного критерия в принципиальном отношении не вызывает никаких проблем, о чем подробно сказано в работах по фонетическому декодированию речи [9, 10]. Отталкиваясь от их рекомендаций, на основе критерия (3) далее предлагается новая технология психокоррекции эмоционального состояния пользователя по голосу. Ее программная реализация в своем пилотном варианте базируется на авторском программном решении "Voice Self-Analysis".

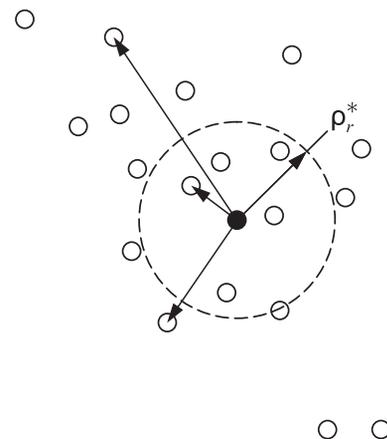


Рис. 1. Фонетический кластер

Программная реализация информационного критерия

Главное окно программы показано на рис. 2.

Показатель текущего ФКР из выражения (3) формируется (оценивается) в программе в режиме скользящего окна — в пределах отрезка речевого сигнала x фиксированной длительности. На экран компьютера он выводится в своем относительном (процентном) выражении

$$\delta_r = 100 / (1 + \rho_r^*), \% \quad (4)$$

Для анализа ФКР при этом используются шесть гласных звуков русской речи: "А", "О", "У", "И", "Ы" и "Э" (случай $R = 6$) как наиболее информативные среди всех других МРЕ в акустико-артикуляционном смысле [9]. График в верхней части окна отображает динамику формируемой оценки (4) от одного отрезка речевого сигнала к другому в процессе устного чтения диктором (он же — пользователь программы) некоторого контрольного текста. В рассматриваемом здесь случае отображен конкретный результат при работе с гласной фонемой "О". Последний отрезок показан во временной диаграмме в нижней части окна. Идея данной процедуры очевидна: читая вслух определенный текст, пользователь неизбежно стремится его понять и поэтому сосредотачивает все свое внимание на содержании текста. И в случае успеха этим приводит в норму свое текущее эмоциональное состояние. В программе данное событие фиксируется по допустимой (регулируемой самим пользователем) интенсивности колебаний показателя ФКР в динамике — на интервале в три последних отрезка речевого сигнала суммарной длительностью 1 мин. Для этого используется специальный индикатор в правой части окна программы. В его работе задействована простая логика: в нормальном эмоциональном состоянии каждый конкретный пользователь характеризуется устойчивым фонетическим качеством своей речи. Отметим, что 1 мин — это и минимально возможное время работы пользователя с программой — на стадии диагностики своего эмоционального состояния в том случае, если психокоррекция ему не требуется.

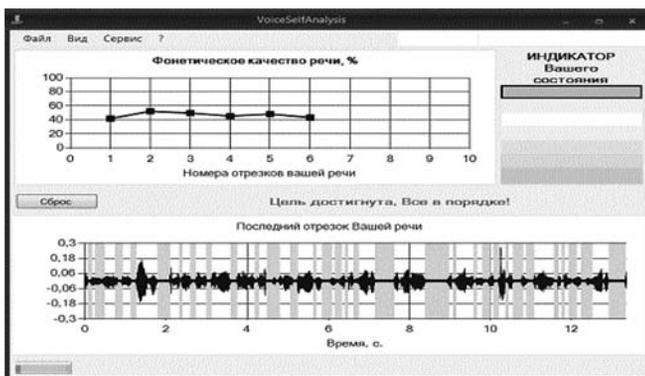


Рис. 2. Главное окно программы

В случае, отображенном на рис. 1, процедура заняла 1 мин 40 с (пять последовательных отрезков речевого сигнала), включая 40 с на психокоррекцию эмоционального состояния пользователя. Ее содержанием служит та же процедура устного чтения, что и на стадии диагностики. При этом минимум ФКР имеет место, как правило, в начале периода чтения текста, так как пользователь в данный момент был недостаточно сосредоточен. Напротив, максимум качества речи обычно был зафиксирован ближе к концу периода — в момент наибольшей концентрации внимания пользователя на тексте. И, что характерно, в самом конце периода чтения показатель качества (4) обычно не сильно, но все же понижается — по мере естественного утомления пользователя в процессе непрерывного чтения. Отметим, что зафиксированные на рис. 2 абсолютные значения показателя характеризуют индивидуальные особенности психотипа конкретной личности.

При проведении эксперимента длительность всех отрезков (см. рис. 1) была установлена равной 20 с. При частоте дискретизации 8 кГц это дало 160 тыс. отсчетов на один отрезок речевого сигнала, или не менее $L = 80$ тыс. отсчетов (50 %) в расчете на гласные звуки. В пересчете к каждой из гласных на интервале квазистационарности речевого сигнала (10...15) мс в среднем получаем порядка 100 ее аллофонов ($J \geq 100$) по каждому отрезку. В таком случае точность оценки информационного показателя (4) может быть охарактеризована в данном случае погрешностью измерений (5...10) % на уровне значимости 0,1 и ниже [12]. При учете минимальной длительности одного отрезка речевого сигнала это означает успешное решение острейшей в задачах автоматической обработки речи проблемы малых выборок. Эффективность рассмотренной технологии исследуется далее экспериментальным путем.

Программа и методика экспериментального исследования

Для экспериментальных исследований из числа студентов бакалавриата Нижегородского государственного лингвистического университета (НГЛУ) была сформирована контрольная группа дикторов — 52 человека. Каждым из них трижды подряд (в три сеанса или три попытки с минимальными интервалами между ними) был прочитан один и тот же художественный текст — из первой главы романа А. С. Пушкина "Евгений Онегин" — в объеме, достаточном для достижения успеха при работе студента с программой. В результате объем экспериментальной выборки в сумме составил 156 (52×3) наблюдений. Известно [12], что в задачах статистической обработки информации этого вполне достаточно для получения высокоточных статистических оценок с доверительной вероятностью 0,9 и выше — практически достоверное событие. Тем самым было выполнено первое требование к программе и ме-



Рис. 3. Гистограммы распределения студентов по времени достижения успеха в трех сеансах



Рис. 4. Гистограммы распределения студентов по двум категориям



Рис. 5. Гистограммы распределения студентов по курсам бакалавриата

тодике эксперимента, а именно — в отношении надежности ожидаемых результатов. Второе важное требование — к валидности проведенного исследования — было подробно рассмотрено ранее во вводной части настоящей статьи со ссылкой на известные работы по оценкам эмоционального состояния личности по голосу.

Результаты экспериментального исследования по каждому отдельному студенту фиксировались далее в виде достигнутого им в каждой отдельной попытке значения показателя ФКР, а также затраченного на каждый сеанс времени, измеряемого в относительных единицах — числе отрезков речевого сигнала, используемых данным студентом при достижении успеха.

Все вычисления в процессе эксперимента проводились на современном ноутбуке Asus N61D, 4 Гбайт ОЗУ, Windows 10. Кроме того, использовался комплекс специальных аппаратных и программных средств, в том числе внешний микрофон Sony. Частота дискретизации встроенного АЦП была установлена равной 8 кГц — стандартное значение при обработке речевого сигнала в расчете на стандартный телефонный канал связи. Полученные результаты отражены в гистограммах на рис. 3—5.

Основные результаты

На рис. 3 представлены три гистограммы распределения студентов по категориям в зависимости от длительности их сеансов работы с программой.

Здесь номера категорий расставлены пропорционально времени достижения каждым студентом успеха: 1-я категория — это минимум времени (3 последовательных отрезка речевого сигнала, или 1 мин), 2-я категория — 4 отрезка, или 1 мин 20 с, и т.д. Как видим, максимальная длительность одного сеанса работы студентов с программой из представительной контрольной группы не превысила 2 мин 40 с (6-я категория). При этом гистограммы для разных сеансов хотя и не очень существенно, но все же разнятся между собой. И этому имеется простое объяснение.

После быстрого достижения успеха в первой попытке часть студентов ослабила свое внимание на

тексте, а часть — подустала, что привело к дополнительным сбоям студентов во второй и третьей попытках. Однако в любом случае можно говорить о высокой степени устойчивости результатов психокоррекции: в среднем в процессе 2-го и 3-го сеансов примерно $0,5(79/92 + 75/79) = 90,40\%$ студентов подтвердили свои высокие кондиции, достигнутые по результатам проведенных сеансом раньше процедур диагностики и психокоррекции. И это высокий результат с практической точки зрения.

Рассмотренный эффект наглядно проявляется в трех гистограммах на рис. 4, где все студенты разделены на две принципиально различные категории.

Первую категорию составили студенты, не нуждавшиеся в психокоррекции по результатам проведенной диагностики своего текущего эмоционального состояния в течение одной минуты. Студенты 2-й категории в психокоррекции, напротив, нуждались и этим несколько "затянули" свои сеансы работы с программой; особенно сильно — два последних из них. Правда, доля таких студентов в худшем случае не превышает 20%. И этот результат также имеет очевидную практическую ценность.

В развитие сделанных выводов на рис. 5 представлены гистограммы распределения студентов по двум категориям в зависимости от курса бакалавриата. Из их сопоставления хорошо видно, что потребность в психокоррекции естественным образом убывает по мере взросления студентов. Отсюда следует важный вывод в отношении области практического применения разработанной технологии: она рассчитана главным образом на детей, подростков и юношей.

Заключение

Таким образом, благодаря проведенному исследованию дано теоретическое и экспериментальное обоснование новой технологии психокоррекции эмоционального состояния пользователя по голосу с автономным программным обеспечением. Ее главное преимущество по сравнению с известными аналогами состоит в высокой степени оперативности процедуры — 2...3 мин в день — при соблюдении абсолютной приватности. Поэтому разработанную

технологии можно рекомендовать к применению широкой категории пользователей самого разного возраста в качестве эффективного средства ауто-тренинга перед ответственными мероприятиями в их жизни, такими как экзамены, деловые встречи, собеседования и др. К числу же наиболее перспективных сфер практического применения новой технологии следует отнести детскую педагогику и психологию, где стрессы и эмоциональные срывы студентов и школьников на протяжении ряда последних лет являются одной из наиболее актуальных проблем.

Представленная работа выполнена согласно открытому плану лаборатории междисциплинарных исследований при НГЛУ. Авторы выражают свою благодарность коллегам О. Я. Родькиной и В. А. Никольской за помощь в подготовке и сборе экспериментального материала.

Список литературы

1. Ушакова Т. Н. Взаимодействие психологического и физиологического в речи человека // Психологический журнал. 2012. Т. 33, № 3. С. 5—16.
2. Родькина О. Я., Никольская В. А. К проблеме распознавания психоэмоционального состояния человека по речи с использованием автоматизированных систем // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 10. С. 728—733.

3. Савченко В. В., Васильев Р. А. Результаты экспериментального исследования фонетического детектора лжи // Материалы 4-й Всероссийской НТК "Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники". г. Владимир, 13—14 ноября 2014 г. М.: Изд-во РАРАН, 2014. С. 139—141.

4. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю. Обучение звуковому строю языка глухонемых и слабослышащих на основе информационной теории восприятия речи // Информационные технологии. 2010. № 2. С. 60—66.

5. Savchenko V. V. The Principle of the Information-Divergence Minimum in the Problem of Spectral Analysis of the Random Time Series Under the Condition of Small Observation Samples // *Radio-physics and Quantum Electronics*. 2015. Vol. 58, N. 5. P. 373—379.

6. URL: <https://sites.google.com/site/frompldcreators/produkty-1/voice-self-analysis>

7. Veldhuis R., Klabbers E. On the Computation of the Kullback—Leibler Measure for Spectral Distances // *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*. 2003. Vol. 11, N. 1. P. 100—103.

8. Kullback S. Information theory and statistics. New York: 1997. Dover Publications. 399 p.

9. Савченко А. В., Савченко В. В., Акатьев Д. Ю., Губочкин И. В. Информационная система тестирования эмоционального состояния личности по голосу: Программа для ЭВМ. Роспатент: по заявке № 2013611003 от 09.01.2013.

10. Савченко В. В. Распознавание речевых команд методом фонетического декодирования слов с подавлением фонового шума // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 1. С. 76—80.

11. Chen G., Koh S. N., Soon I. Y. Enhanced Itakura measure incorporating masking properties of human auditory system // *Signal Process*. 2003. Vol. 83. P. 1445—1456.

12. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений. М.: Недра, 1983. 223 с.

V. V. Savchenko, Dr. Sci. Tech., Prof., e-mail: svv@lunn.ru,

D. Yu. Akatyev, Cand. Tech. Sci., Ass. Prof., e-mail: akatjev@lunn.ru,

Nizhniy Novgorod State Linguistic University of N. A. Dobrolyubov, Nizhniy Novgorod, 603155, Russia

Information Technology of Psychocorrection of an User Emotional State Based on his Oral Reading

Using the universal information-theoretical approach in the Kullback—Leibler metric, the task of developing and researching a new information technology for the psycho-correction of the user's emotional state based on phonetic analysis of his oral speech during reading is being and solved. The pilot software implementation is considered; full-scale experiment is conducted. It is shown that the advantage of the new technology in comparison with its analogues is the efficiency of the procedure while maintaining absolute privacy.

Keywords: speech, speech analysis, speech signal, speech information technology, the problem of small samples, information-theoretical approach

References

1. Ushakova T. N. Vzaimodejstvie psihologicheskogo i fiziologicheskogo v rechi cheloveka, *Psihologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 33, no. 3, pp. 5—16 (in Russian).

2. Rod'kina O. Ya., Nikol'skaya V. A. K probleme raspoznavaniya psihohemotsional'nogo sostoyaniya cheloveka po rechi s ispol'zovaniem avtomatizirovannykh sistem, *Informacionnye tekhnologii*, 2016, vol. 22, no. 10, pp. 728—733 (in Russian).

3. Savchenko V. V., Vasil'ev R. A. Rezul'taty ehksperimental'nogo issledovaniya foneticheskogo detektora, *Materialy 4-j Vserossijskoj NTK "Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy voennoj tekhniki"*. g. Vladimir, 13—14 noyabrya 2014 g., Moscow, Izd-vo RARAN, 2014, pp. 139—141 (in Russian).

4. Savchenko V. V., Akat'ev D. Yu. Obuchenie zvukovomu stroyu yazyka gluhonemykh i slaboslyshashchih na osnove informacionnoy teorii vospriyatiya rechi, *Informacionnye tekhnologii*, 2010, no. 2, pp. 60—66 (in Russian).

5. Savchenko V. V. The Principle of the Information-Divergence Minimum in the Problem of Spectral Analysis of the Random Time

- Series Under the Condition of Small Observation Samples, *Radio-physics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 373—379.

6. URL: <https://sites.google.com/site/frompldcreators/produkty-1/voice-self-analysis> [Elektronnyj resurs].

7. Veldhuis R., Klabbers E. On the Computation of the Kullback—Leibler Measure for Spectral Distances, *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, 2003, vol. 11, no. 1, pp. 100—103.

8. Kullback S. Information theory and statistics. New York, Dover Publications, 1997, 399 p.

9. Savchenko A. V., Savchenko V. V., Akat'ev D. Yu., Gubochkin I. V. *Informacionnaya sistema testirovaniya ehmsotsional'nogo sostoyaniya lichnosti po golosu: Programma dlya EHM*. Rospatent: po zayavke № 2013611003 ot 09.01.2013.

10. Savchenko V. V. Raspoznavanie rechevykh komand metodom foneticheskogo dekodirovaniya slov s podavleniem fonovogo shuma, *Informacionnye tekhnologii*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 76—80 (in Russian).

11. Chen G., Koh S. N., Soon I. Y. Enhanced Itakura measure incorporating masking properties of human auditory system, *Signal Process*, 2003, vol. 83, pp. 1445—1456.

12. Bol'shakov V. D. *Teoriya oshibok nablyudenij*, Moscow, Nedra, 1983, 223 p. (in Russian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 629.7.017.1

Т. М. Волосатова, канд. техн. наук, доц., tamaravol@gmail.com,

П. А. Воронина, магистрант, voronina.p.a@yandex.ru, **А. А. Козарь**, магистрант, kozar.a.a.rk6@yandex.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Имитационное моделирование угроз информационной безопасности систем модульной авионики

Изложены результаты исследований и анализа вычислительных средств в комплексах связи и навигации самолета, проведенных в целях построения формализованной модели угроз. На основе анализа обзоров доступной литературы показано, что проблема безопасности полетов нарастает. Анализ доступных источников показал, что в условиях повышения уровня автоматизации перспективных авиационных двигателей, бортового оборудования, систем и агрегатов летательных аппаратов, возрастания сложности бортовых информационных систем существенное значение приобретает проблема защиты автоматизированных систем авиационной техники от угроз информационной безопасности. Показана возможность имитационного моделирования атак на вышеуказанные системы с применением аппарата сетей Петри.

Ключевые слова: авионика, автоматизированные системы, безопасность, вычислительные системы, информация, модуль, платформа, сеть Петри

Введение

Работа посвящена результатам программной реализации имитационной модели угроз комплекса бортового оборудования (КБО) интегрированной модульной авионики (ИМА). Анализ обзоров, приведенных в доступной литературе, показывает, что проблема безопасности полетов нарастает [1–4]. По мнению специалистов, в условиях повышения уровня автоматизации перспективных авиационных двигателей, бортового оборудования, систем и агрегатов летательных аппаратов (ЛА), возрастания сложности бортовых информационных систем существенное значение приобретает проблема защиты автоматизированных систем авиационной техники от угроз информационной безопасности [5–8]. Источниками подобных угроз являются:

- беспроводные информационно-телекоммуникационные устройства пассажиров, находящиеся на борту летательного аппарата во время полета;
- информационные атаки внешних злоумышленников по беспроводным каналам передачи данных, обеспечивающим доступ к бортовой вычислительной сети;
- помехи, случайно либо умышленно поставленные с помощью средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Основные факторы, обуславливающие актуализацию угроз информационной безопасности в отношении бортовых автоматизированных систем (БАС), следующие:

- увеличение функциональной нагрузки и возрастание сложности бортовой вычислительной сети, лежащей в основе всего КБО;
- резкое возрастание сложности (и, как следствие, числа несовершенств) контрольно-измерительной ("сенсорной") инфраструктуры перспективных двигательных установок и общесамолетных систем, включающей распределенные сети интеллектуальных датчиков и базирующейся, в том числе, на использовании беспроводных технологий;
- недеklarированные возможности (НДВ) встроенного программного обеспечения (ПО) бортового радиоэлектронного оборудования.

Одним из путей повышения надежности ИМА является активное применение CALS-технологий, т.е. сопровождения объекта проектирования в период всего жизненного цикла. Это, в свою очередь, требует и сопровождение объекта на модели поведения.

Все перечисленное выше позволяет утверждать, что задача имитационного моделирования поведения ИМА в условиях эксплуатации является актуальной. Описываемая программная реализация является основой программного обеспечения автоматизированного рабочего места подсистемы САПР ИМА.

1. Цель исследований и решаемые задачи

В процессе исследований проведен аналитический обзор доступных источников [4–8], позволивший установить, что для разработки средств бес-

печения информационной безопасности (ИБ) ЛА необходима строгая и хорошо формализованная модель угроз. Известные подходы к ее построению основаны на вербальных оценках и обобщении мнений экспертов. При этом невозможно ограничить область адекватности теоретически возможными атаками, т. е. обеспечить необходимую полноту модели. Кроме того, такие модели не учитывают лавинообразно нарастающие сбои и отказы КБО [1] (эффект "домино"). Таким образом, целью настоящей публикации является описание разработанной программной реализации модели угроз ИБ КБО при лавинном нарастании атак. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ состава КБО ЛА с учетом перспектив его развития;
- анализ атак на ИБ КБО, возможность которых ограничена физической реализуемостью;
- выявление условий возникновения спровоцированных лавинных сбоев и отказов.

2. Анализ комплекса систем управления ЛА

Результат обзора доступных источников [4—8, 11] показывает, что проектирование БАС ЛА, отдельных приборов, устройств и подсистем направлено на создание единого (интегрированного) комплекса (ИБАС). Бортовые комплексы автоматических систем представляют собой системы, функционирующие в различных условиях и ситуациях, определяемых состоянием внешней среды, внутренним состоянием систем и аппарата в целом. Представим состав БАС с точки зрения информационных систем. В состав бортовых автоматических комплексов с информационной точки зрения входят объекты управления и управляющие системы. Объектами управления являются рулевые органы, двигатели, средства разгона и торможения, различные исполнительные органы и т.д.

Элементами управляющих систем являются датчики информации о внешней среде, о состоянии бортовых систем и положении аппарата в простран-

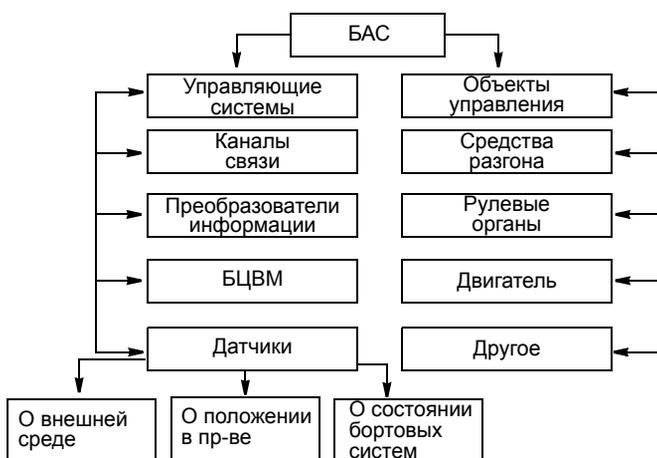


Рис. 1. Общий состав бортовых автоматических систем ЛА

стве, преобразователи информации, каналы связи и бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ). Отметим, что их чаще всего несколько — одна центральная и несколько периферийных [11—16]. Вместе они образуют бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС). БЦВС являются ядром БАС, выполняя основные вычислительные задачи комплекса. Структура и состав БАС приведены на рис. 1.

3. Модель системы контроля бортовых вычислительных средств ЛА

3.1. Выбор объекта моделирования

Модель предназначена для сопровождения БЦВС 5-го поколения. Анализ публикаций [10—15] показал возможность и необходимость использовать в качестве прототипа бортовую цифровую вычислительную платформу "Крейт-6U", разработанную в ФГУП "СПб ОКБ "Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова" [16]. БЦВС построена на основе унифицированных функциональных модулей (ФМ).

3.2. Выбор средств моделирования

Анализ [17—19] показал, что, несмотря на огромное разнообразие различных инструментов для проведения имитационного моделирования (например, типичная среда AnyLogic), получили преимущественное распространение имитационные модели на основе сетей Петри и их расширений. Сети Петри иерархичны, имеют статическую структуру, позволяют описывать и отображать как текущее состояние, так и процессы функционирования моделируемых систем. Аппарат сетей Петри содержит большие потенциальные возможности для формализованного описания и имитационного моделирования БВС.

В качестве исходного формализма для разработки модели были выбраны И-сети (имитационные сети), ориентированные на решение задачи анализа и оценивания систем на стадиях их проектирования и сопровождения. И-сети содержат все расширения последовательности модифицированных сетей Петри, направленных на моделирование вычислительных систем:

сети Петри → временные сети Петри →
→ E-сети → M-сети → И-сети [5].

Кроме того, введены следующие модификации.

1. Вместо набора базовых типов переходов введен универсальный переход, условия реализации которого и правила приема меток из входных позиций могут быть любыми функциями статусов входных и выходных позиций перехода, а правила выдачи меток в выходные позиции перехода — функциями статусов входных и выходных позиций и атрибутов принятых меток.

2. Переход может содержать процедурную часть — вычислительный алгоритм, выполняемый при срабатывании перехода. Введение в переход вычисли-

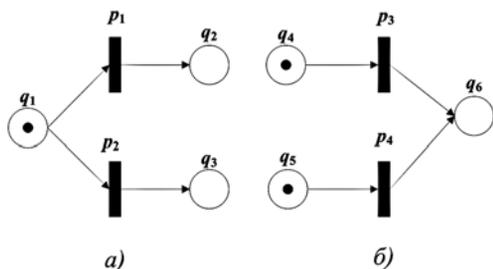


Рис. 2. Конфликтные ситуации

тельной части вызвано необходимостью выполнения алгоритмов рабочих программ в процессе имитации функционирования объекта моделирования.

3. Метка в качестве своего атрибута может содержать не только переменные, но и алгоритмы, выполнением которых управляют переходы, принявшие метку, что позволяет моделировать выполнение алгоритмов рабочих программ БЦВМ.

4. Временной параметр перехода может быть принадлежностью данного перехода, атрибутом принятой метки, а также функцией атрибутов принятых меток и модельного времени. Во втором случае переход моделирует активность, длительность которой определяется свойствами данных, над которыми она действует.

5. Практика сетевого моделирования показала, что в сетевой модели можно выделить позиции, в которых постоянно находятся метки (например, списки временных заданий, значения некоторых регистров и т.д.). Для их моделирования введены информационные позиции (графически изображаются наполовину заштрихованными кружками). При приеме метки из такой позиции ее статус не обнуляется, метка сохраняется. Статус информационной позиции обнуляется только при записи в нее нулевой информации.

6. В И-сетях из каждой позиции выходит и в каждую позицию входит не более одной дуги. Наличие у позиции нескольких входных или выходных дуг может приводить к конфликтным ситуациям (рис. 2).

В сети, отображенной на рис. 2, а, конфликт возникает, когда в позицию q_1 поступает метка. Неясно, какой из переходов p_1, p_2 должен реализоваться и принять метку. В сети, отображенной на рис. 2, б, конфликт может возникнуть при одновременном завершении переходов p_3 и p_4 . Неясно, какая из меток — $m(q_4)$ или $m(q_5)$ — перейдет в позицию q_6 . Если не введено ограничение на количество инцидентных позиций дуг, в определении сети должно быть предусмотрено разрешение конфликта (например, переходам могут быть присвоены приоритеты). В рамках введенного ограничения, конфликтные ситуации, отображенные на рис. 2, а и рис. 2, б могут быть описаны сетями, где вве-

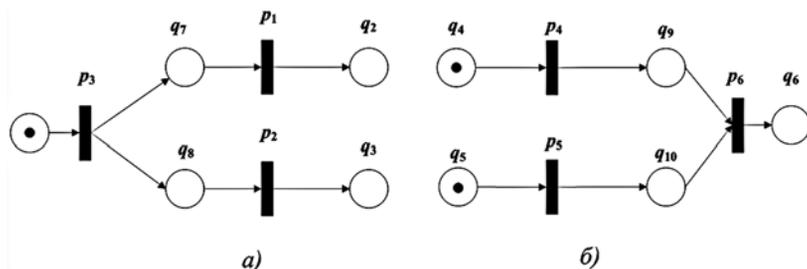


Рис. 3. Разрешение конфликтных ситуаций

дены дополнительные позиции (рис. 3, а и рис. 3, б соответственно).

Представленная далее модель строится на основе сети Петри [17–19]. В качестве среды создания модели был использован программный модуль PIPEv 4.3 [19]. Структурная схема моделируемой БЦВС представлена на рис. 4. В качестве ФМ выступают:

- модули вычислительные (МВ), выполняющие расчеты сигналов управления полетом ЛА;
- модули ввода-вывода (МВВ), обеспечивающие функции обмена информацией по последовательным каналам (ПК), мультиплексным каналам обмена, разовым командам (РК);
- графические модули, обрабатывающие изображение для его вывода на средства бортовой индикации;
- модули постоянной памяти, предназначенные для хранения программного обеспечения;
- модули электропитания (МН), обеспечивающие преобразования напряжения бортовой резервированной сети во вторичные напряжения, необходимые для электропитания модулей.

В структурной схеме БЦВС: МКИО — мультиплексный канал информационного обмена; МН — модуль электропитания, преобразующий $U_{6.c}$ — напряжение бортовой сети во $U_{втор}$ — вторичные напряжения; ПК — последовательный канал; РК — разовые команды; ФМ — функциональный модуль; МГ — графический модуль. Имитационная модель системы контроля БЦВС на основе сети Петри представлена на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

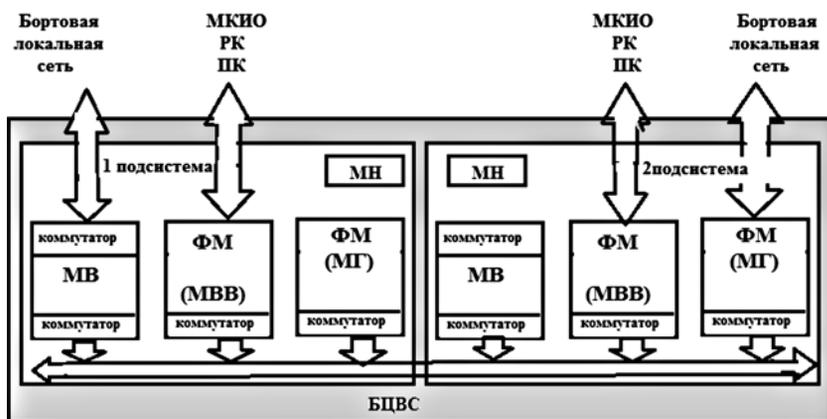


Рис. 4. Структурная схема БЦВС

3.3. Описание модели

В модели учтено следующее:

- затраты по времени на направление запроса, тестирования и ожидания ответа от БЦВС;
- возможность распознавания отрицательных результатов тестирования;
- иерархия, так как некоторые переходы не являются мгновенными и имеют вложенные цепи.

Описываемая модель (рис. 5) является примером, подтверждающим работоспособность выбранной методики, поэтому время прохождения переходов устанавливается условно, сообразно соответствующим им задачам, а не снимается с реальной БЦВС.

3.4. Выполнение моделирования

При подаче начальных напряжений отсутствуют сигнал исправности и неисправности, контентная информация подготовлена для загрузки в ПЗУ. Согласно рис. 5 позиции, определенные особенностями БЦВС, заполняются метками до старта. В каждой паре характеризуемых позиций метка в одной из них исключает возможность занесения метки в другую по умолчанию, ингибиторная связь в этом случае не требуется. Для заполнения данных позиций требуется информация о типе предпочтительного автоматического контроля (стандартный или расширенный); о числе задач, выполняемых модулями в данный момент (данные позиции динамически изменяемы в соответствии с текущими параметрами системы); о оценочной характеристике ресурсов работающих функциональных модулей (также динамически изменяемы). В начальном положении таймеры обнуляются, модули массовой памяти (ММП) пусты, функциональное программное обеспечение (ФПО) не проинициализировано. Инициатором начала движения меток служит факт подачи начального напряжения БЦВС. Блоки тестирования функциональных модулей последовательно проверяют узел функций модуля (УФМ), узел поддержки модуля (УПМ), узел связи по межмодульному интерфейсу (УМИ), узел связи с мезонинами (УСМ), которым соответствуют переходы каждого слоя блоков. Тестирование проходит как для рабочих, так и для резервных модулей. Вместе со стартом тестирования запускается и таймер блоков тестирования, останавливается он, соответственно, при окончании тестирования. В случае успешного завершения тестирования рабочих ФМ метка, прошедшая сквозь тест, не позволяет пройти метке, задержанной перед таймером с помощью ингибиторной связи. В случае отсутствия метки от тестов метка от таймера беспрепятственно проходит к своей ветви развития событий.

Обработка варианта успешного прохождения теста происходит следующим образом: при первом же переходе по этой ветви осуществляется установка сигнала исправности. Затем следует инициализация функционального программного обеспечения для каждого из ФМ. Далее выполняется иерархически вложенная сеть, моделирующая запуск

циклов ФПО. На каждой итерации проводятся тесты ФМ на работоспособность в режиме, заданном входными данными. При успешном прохождении теста метка переходит к следующему циклу ФПО.

Для обработки неудачного исхода тестирования на итерациях применяется обнуляемый таймер, из которого задерживаемая метка приходит к переходу с ингибиторной связью после получения результатов теста в заданном режиме.

В случае сбоев и отказов на итерациях выполнения циклов ФПО, а также если работающие ФМ не прошли тестирование, метка переходит к блоку оценки резервных ФМ. Проверка резервных модулей, осуществленная при начальном тестировании, передает (в случае успеха) метку в блок оценки резервных модулей. Если в упомянутый блок пришли обе метки, то осуществляется загрузка ФПО с учетом реконфигурации (используются резервные ФМ). Если же пришла лишь метка от неудачных тестирований, то проводится оценка ресурсов работающих модулей.

Если каждый модуль выполнял не одну задачу и у работающих ФМ есть дополнительные ресурсы, проводится реконфигурация. Реконфигурация при назначении каждой задачи на индивидуальное функциональное устройство возможна только при наличии исправных модулей в резерве. Если модуль в резерве доступен, в его ячейки памяти ОЗУ модулей ММП заносится ФПО, ранее исполнявшееся отказавшим модулем.

Реконфигурация при назначении нескольких задач на один функциональный модуль возможна не только при наличии резервного исправного модуля, но и в случае, если у исправных модулей имеются дополнительные (незадействованные) ресурсы для решения задач авионики, которые выполнял отказавший модуль.

Способность БЦВС к реконфигурации при назначении задач, когда один модуль выполняет одну задачу, а три других модуля одной подсистемы выполняют по несколько задач каждый, зависит от того, какой из КФМ отказал. Если зафиксирован отказ модуля, который выполнял одну задачу, то реконфигурация возможна и при наличии резервного модуля, и при наличии свободных вычислительных ресурсов исправных модулей. После проведения процедуры реконфигурации алгоритм работы БЦВС будет следующий: при положительном результате реконфигурирования формируется сигнал исправности, обновляется ФПО в ячейках памяти КФМ и БЦВС приступает к выполнению ФПО. При неудачном результате реконфигурирования "снимается" сигнал исправности БЦВС, и вычислительная система считается неисправной. В качестве выходного параметра выступает сигнал, характеризующий состояние БЦВС. Сигнал исправности приводит к итерационному выполнению циклов ФПО. Сигнал неисправности обрывает работу и иницирует выполнение аварийных инструкций.

Далее рассмотрим использование И-сетей Петри для формализованного описания процесса функцио-

нирования БЦВС на примере моделирования дискретного контура управления ориентацией пилотируемого ЛА. В данном примере рассматривается режим выполнения ориентации ЛА в системе координат, фиксируемой на момент начала режима. На рис. 6 приведена структурная схема контура управления.

В структурной схеме контура управления ориентацией сам контур управления включает систему исполнительных органов (СИО), объект управления — летательный аппарат в угловом движении и кинематические соотношения углового движения (КИП), блок датчиков угловых скоростей (БДУС) летательного аппарата, блок формирования результирующего закона управления (БФРЗУ). Управляющие воздействия передаются в выходной регистр БЦВС, с которого через устройство согласования поступают на систему исполнительных органов. Сетевая модель описанного контура управления представлена на рис. 7. БЦВС моделируется в той части, которая обеспечивает выполнение данного режима. В рассматриваемом примере учтены два источника прерывания: от таймера и от пульта оператора, с которого задается режим управления и установочные данные. Не учитывается механизм формирования очереди фоновых, не связанных с задачей управления программ. Выполнение программы, реализующей алгоритм управления, и фоновой программы представляется метками, движущимися по сети, со следующими атрибутами: T — время выполнения программы; $PROC$ — имя программы; PP — признак разрешения прерывания программы во время выполнения (атрибут $PP = \text{"да"}$ для фоновых программ и атрибут $PP = \text{"нет"}$ для программы режима управления).

В И-сетевой модели контура управления ориентацией обозначены: p_1 — таймер; p_2 — обработка прерываний; q_7 — список циклически выполняемых программ; q_9, q_{10}, q_{11} — очередь программ на выполнение; p_3 — запись программ в очередь на

выполнение; p_4 — выполнение программ. Переход p_5 моделирует систему исполнительных органов, угловое движение ПКА и датчики БДУС. Переход p_1 моделирует работу таймера. Он выполняется, если в позиции q_1 есть метка, принимает метку из q_1 и через время цикла работы БЦВС (τ_{p1}) выдает метки на выходные позиции перехода — q_1 и q_2 . Для того чтобы запустить таймер, достаточно поместить метку в позицию q_1 .

Переход q_2 моделирует обработку прерываний. Он наступает, если хотя бы в одной из позиций q_2 или q_4 есть метка. Если метка в q_4 , то переход принимает метки m_{p3}, m_{p4} . Если метка m_{q4} содержит установки на разворот, то установки передаются в глобальную область памяти, а метка, содержащая программу режима, из позиции q_3 передается в позицию q_7 , моделирующую список циклически выполняемых программ. Если же метка есть в q_2 , но ее нет в q_4 , то принимаются метки m_{q2}, m_{q5} . Метка из позиции q_2 передается в позицию q_6 , атрибуты метки m_{q5} , моделирующие показания датчиков БДУС, передаются в глобальную область памяти.

Переход p_3 наступает, если в позиции q_6 есть метка, принимает метки из позиции q_6, q_7 , метку m_{q7} передает в позицию q_9 — очередь программ на выполнение к процессору.

Переход p_4 моделирует выполнение рабочих программ. Переход наступает, если хотя бы в одной из входных позиций есть метка, принимает одну из меток по приоритету: m_{q9}, m_{q10}, m_{q8} (фоновые программы). При этом, если атрибут принятой метки $PP = \text{"да"}$, т. е. принятая программа допускает прерывание, временному параметру перехода присваивается единичное значение, значение атрибута T принятой метки уменьшается на единицу и принятая метка с измененным значением атрибута T пересылается в позицию q_{10} . Так продолжается до тех пор, пока значение атрибута T не станет равным единице. Как только это произойдет, выполняется программа, указанная в атрибуте PRG принятой метки. Если же значение атрибута метки $PP = \text{"нет"}$, т. е. программа не допускает прерываний при выполнении, временному параметру перехода присваивается значение атрибута T принятой метки, выполняется указанная программа, а рассчитанные в программе управляющие воздействия передаются в выходную позицию q_{11} в качестве атрибутов метки m_{q11} .

Переход p_5 представляет собой модель углового движения ЛА в виде системы дифференциальных уравнений. Действие перехода заключается в одном шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений. Чтобы инициировать переход, достаточно поместить в позицию q_{12} метку, содержащую в качестве атрибутов начальные условия интегрирования. Далее переход выполняется циклически с шагом, равным шагу интегрирования. Переход p_5 принимает метки из q_{12} и q_{11} , выполняет один шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений, результат интегрирования — угловые скорости ЛА — передает в позиции q_{12}, q_5 .

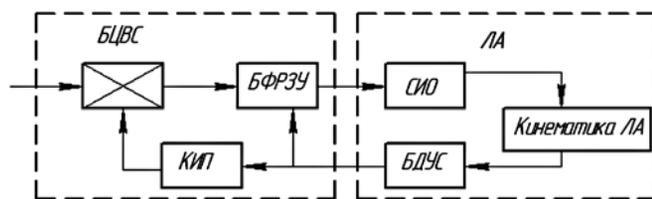


Рис. 6. Структурная схема контура управления ориентацией

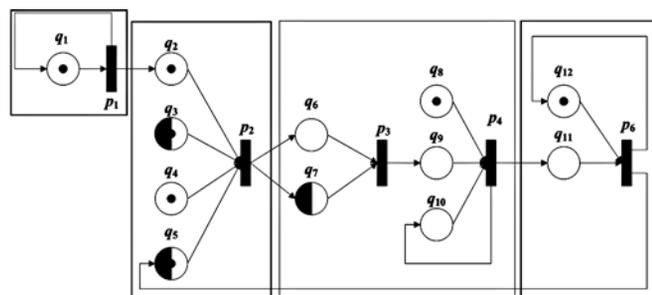


Рис. 7. И-сетевая модель контура управления ориентацией

Как видно, данная сетевая модель близка к реальной системе, так как отражает и структуру, и функциональные связи моделируемой системы, топологию и динамику сети — перемещение меток по сети и изменение их атрибутов в процессе движения. Работа БЦВС и движение ЛА происходят параллельно во времени, что также отражено в И-сетевой модели: переходы p_1 и p_5 (модели таймера БЦВС и модели СИО, БДУС и углового движения ЛА) инициируются независимо друг от друга метками в позициях q_1 и q_{12} соответственно и протекают параллельно в течение модельного времени.

Модели ЛА и БЦВС связаны следующим образом: в модель БЦВС поступают показания с датчиков БДУС, а из модели БЦВС в систему исполнительных органов выдаются управляющие воздействия. Эту связь отображают позиции q_5 и q_{11} . Позиция q_5 моделирует регистр, на который поступают показания с датчиков, а метка в позиции q_5 моделирует его содержимое. Позиция q_{11} и метка в позиции моделируют регистр, с которого в СИО поступает управляющее воздействие.

Состояние модели в любой момент времени может быть определено разметкой сети. Таким образом, имеется возможность контролировать процесс функционирования модели и управления процессом.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

- возможно сопровождение бортовых ВС ЛА на всем жизненном цикле ИМА, как в процессе функционирования, так и при доработках;
- применение аппарата моделирования на основе сетей Петри предпочтительно при построении имитационных моделей угроз ИБ ИМА.

Список литературы

1. Глинская Е. В., Чичварин Н. В. Моделирование угроз информационной безопасности бортовых вычислительных средств самолета // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2016. — № 6. С. 85—97.
2. URL: www.aviasafety.ru/crash-stat (дата обращения 25.12.2016).

3. Информационная безопасность. Android. Блог компании "Apps4All". URL: <http://apps4all.ru/?type=7> (дата обращения 25.12.2016).
4. Документы ИКАО — Библиотека — Авиационный портал Airspot. URL: airspot.ru/library/dokumenty-ikao (дата обращения 20.12.2016).
5. Богданов А. В. и др. Платформа интегрированной модульной авионики. Патент на полезную модель № 108868 U1 RU, МПК G06F 9/00, № 2011121962/08. Заявл. 01.06.2011. Опубл. 27.09.2011.
6. Герлих Х. Модульная система авионики самолета. Патент № 2413655 C2 RU, МПК В64С 19/00. № 2008123940/11. Заявл. 16.11.2006. Опубл. 10.03.2011. Бюл. № 7.
7. Джанджгава Г. И. Авионика пятого поколения: новые задачи — новая структура // Вестник авиации и космонавтики. 2001. № 5. С. 8—10.
8. Евменов А. В. Направления развития интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов гражданской авиации / Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 3. С. 48—53.
9. Писаренкова Н. С., Гарбуз Г. Г. Некоторые вопросы моделирования АСУ ПВО с применением аппарата сетей Петри / Научные труды академии. Вып. 2. Смоленск: ВА ПВО СВ РФ, 1995.
10. Волосатова Т. М., Чичварин И. Н. Структурное моделирование угроз информационной безопасности систем автоматизированного проектирования // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение. 2013. № 3. С. 58—76.
11. Книга Е. В. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 163—165.
12. Коблякова Л. В. Механизм единого времени в бортовых системах SpaceWire // Технические науки. Информатика, вычислительная техника. 2010. № 4. С. 63—71.
13. Антимиров В. М. Создание БЦВС. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015. 70 с.
14. НИИ "Аргон": Официальный сайт. Технология построения открытых, модульных вычислительных средств. URL: www.argon.ru (дата обращения: 30.10.2016).
15. Захарова О. Л., Кирсанова Ю. А., Книга Е. В., Жаринов И. О. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики // Информационно-управляющие системы. 2014. № 3. С. 19—29.
16. Жаринов И. О., Видин Б. В., Шек-Иовсепяни Р. А. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 4 (68). С. 21—27.
17. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
18. Мараховский В. Б., Розенблом Л. Я., Яковлев А. В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Санкт-Петербург: Профессиональная литература. АйТи-Подготовка, 2014. 400 с.
19. Platform Independent Petri net Editor 2: <http://pipe2.sourceforge.net/>: About PIPE2 (дата обращения: 15.12.2016).

T. M. Volosatova, Supervisor, Ph. D., Ass. Prof.,

P. A. Voronina, Master Student, A. A. Kozar, Master Student, BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Simulation Modeling of Information Security Threats Systems Modular Avionics

Presented the results of research and analysis computing means in the complexes of communication and navigation of the aircraft, conducted with the aim of building a formal threat model. On the base of the analysis of available literature is shown that the problem of safety increases. Analysis of available sources showed that the increasing level of automation of advanced aircraft engines, avionics, systems and components aircrafts, the increasing complexity of onboard information systems, the problem of protection of automated systems aviation technology from information security threats takes the significant importance. The possibility of simulation of attacks on the above-mentioned systems using the apparatus of Petri nets is shown.

Keywords: Avionics, automated systems, security, computer systems, information, module, platform, Petri nets

References

1. **Glinskaya E. V., Chichvarin N. V.** Modelirovanie ugroz informacionnoj bezopasnosti bortovyh vychislitel'nyh sredstv samoleta, *Vestnik MGTU im. N. Eh. Baumana, ser. Priborostroenie*, 2016, no. 6, pp. 85–97 (in Russian).
2. **Internet-resurs:** URL: www.aviasafety.ru/crash-stat (data of access: 25.12.2016).
3. **Informacionnaya bezopasnost'.** Internet-resurs: Android. Blog kompanii "Apps4All" (data of access: 25.12.2016).
4. **Dokumenty IKAO** — Biblioteka — Aviacionnyj portal Airspot, Internet-resurs: URL: airspot.ru/library/dokumenty-ikao (data of access: 20.12.2016).
5. **Bogdanov A. V., Vasiliev G. A., Vinogradov P. S., Egorov K. A.** Platforma integrirovannoj modul'noj avioniki, Patent na poleznuyu model' no. 108868 U1 RU, MPK G06F 9/00, № 2011121962/08. Zayavl. 01.06.2011. Opubl. 27.09.2011 (in Russian).
6. **Herlich H.** Modul'naya sistema avioniki samoleta, Patent no. 2413655 S2 RU, MPK V64S 19/00. № 2008123940/11. Zayavl. 16.11.2006. Opubl. 10.03.2011. Byul. № 7 (in Russian).
7. **Dzhandzhgava G. I.** Avionika pyatogo pokoleniya: novye zadachi — novaya struktura, *Vestnik aviacii i kosmonavтики*, 2001, no. 5, pp. 8–10 (in Russian).
8. **Evgenov A. V.** Napravleniya razvitiya integrirovannyh kompleksov bortovogo oborudovaniya samoletov grazhdanskoj aviacii, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2003, no. 3, pp. 48–53 (in Russian).
9. **Pisarenkova N. S., Garbuz G. G.** Nekotorye voprosy modelirovaniya ASU PVO s primeneniem apparata setej Petri, *Nauchnye trudy akademii*, Issue. 2, Smolensk, VA PVO SV RF, 1995 (in Russian).
10. **Volosatova T. M., Chichvarin I. N.** Strukturnoe modelirovanie ugroz informacionnoj bezopasnosti sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya, *Vestnik MGTU. Seriya Priborostroenie*, 2013, no. 3, pp. 58–76 (in Russian).
11. **Kniga E. V., Zharinov I. O., Bogdanov A. V., Vinogradov P. S.** Principy organizacii arhitektury perspektivnyh bortovyh cifrovyyh vychislitel'nyh sistem v avionike, *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 163–165 (in Russian).
12. **Koblyakova L. V.** Mekhanizm edinogo vremeni v bortovyh sistemah SpaceWire, *Tekhnicheskie nauki. Informatika, vychislitel'naya tekhnika*, 2010, no. 4, pp. 63–71 (in Russian).
13. **Antimirov V. M.** Sozdanie BCVS. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2015, 70 p.
14. **НИИ "Argon":** Oficial'nyj sajt. URL: www.argon.ru. Tekhnologiya postroeniya otkrytyh, modul'nyh vychislitel'nyh sredstv (data access: 30.10.2016).
15. **Zakharova O. L., Kirsanov Y. A., Kniga, E. V., Zharinov I. O.** Algoritmy i programmye sredstva testirovaniya bortovyh cifrovyyh vychislitel'nyh sistem integrirovannoj modul'noj avioniki, *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*, 2014, no. 3, pp. 19–29.
16. **Zharinov O. O., Vidin B. V., Shek-Hovsepjan R. A.** Principy postroeniya krejta bortovoj mnogoprocessornoj vychislitel'noj sistemy dlya avioniki pyatogo pokoleniya, *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2010, no. 4 (68), pp. 21–27.
17. **Peterson G.** Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem, Moscow, Mir, 1984, 264 p.
18. **Marakhovsky V. B., Rosenblum L. Y., Yakovlev A. V.** Modelirovanie parallel'nyh processov. Seti Petri, Sankt-Peterburg: Professional'naya literatura, AjTi-Podgotovka, 2014, 400 p.
19. Platform Independent Petri net Editor 2. URL: <http://pipe2.sourceforge.net/>: About PIPE2 (data of access: 15.12.2016).

УДК 004.891

Р. В. Третьяков, начальник отдела, e-mail: tretyakovrv@gmail.com,
АО "СберТех",

Э. М. Димов, д-р техн. наук, проф., e-mail: e.m.dimov@gmail.com,

О. Н. Маслов, д-р техн. наук, проф., e-mail: maslov@psati.ru,

Р. Р. Халимов, канд. техн. наук, доц., e-mail: khalimov@bk.ru,

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

Совершенствование управления процессом разработки программного обеспечения на основе математических моделей и технологии имитационного моделирования

В статье исследованы вопросы повышения эффективности управления процессом разработки программного обеспечения, являющимся недетерминированным процессом, подверженным влиянию человеческого фактора. В качестве механизмов совершенствования исследуемого процесса предлагается методика управления на основе разработанных авторами математических моделей и технологии статистического имитационного моделирования.

Ключевые слова: управление процессом разработки программного обеспечения, совершенствование управления, имитационное моделирование

Введение

Проблемы оптимизации управления процессами, в которых участвуют лица, принимающие решения (ЛПР), до настоящего времени не теряют актуальность и значимость. Это обусловлено тем, что данные процессы имеют место в слабоструктурируемых и слабоформализуемых сложных системах

(СС) нерефлекторного типа, где, в отличие от технических каузальных СС, присутствуют случайные факторы, порождаемые самими ЛПР, которые оказывают значительное влияние и на ход этих процессов, и на их конечные результаты.

Проблемы управления в нерефлекторных СС проявляют себя по-разному в зависимости от того,

могут они или не могут быть строго регламентированными. Процесс оформления кредита, например, состоит из последовательности строго регламентированных шагов: запросить документы у клиента, проверить их корректность и правильность, проверить кредитную историю, сделать запрос на выдачу кредита и др. Каждый из этих шагов завершается одним из заранее известных результатов: получены документы или нет, корректны они или нет, одобрен кредит или не одобрен и т.д. Управление данным процессом существенно упрощается за счет сильной формализации (детерминированности) и связности шагов процесса — следующий шаг или результат процесса отделен от предыдущего минимальным интервалом времени.

В отличие от процесса кредитования процесс разработки программного обеспечения (ПО) невозможно строго регламентировать, даже если использовать известные методологии разработки и системы контроля хода выполнения задач. Это связано с тем, что, независимо от выбранной методологии разработки, в процессе программной реализации исполнитель самостоятельно определяет, какие шаги предпринять для выполнения поставленной задачи: интерпретирует требования, формирует представление о подходе к реализации требований, определяет последовательность создания и составные части ПО, выбирает инструменты для реализации и т.д. Все этапы реализуются и контролируются самим исполнителем, т. е. процесс является творческим, а не директивным, каузальным и детерминированным. По времени полученные результаты могут быть значительно отделены от самого процесса разработки ПО, так как перед внедрением разработанного функционала проводятся его тестирование и внедрение в промышленную эксплуатацию, которые представляют собой отдельные процессы, занимающие дополнительное время. Если исполнитель допустит ошибку в ходе программной реализации, то она может проявиться в ситуации, которая наступит через месяцы или даже годы после внедрения ПО. Таким образом, процесс разработки ПО существенно более сложен для управления, так как действительно слабо формализован и подвержен воздействию большого числа случайных факторов, а его результаты могут быть значительно отдалены во времени от его выполнения.

Целью статьи является разработка подхода к повышению эффективности управления процессом разработки ПО. В качестве объекта исследования рассматриваются типовые процессы, реализуемые в организациях среднего и крупного размера, специализирующихся на разработке ПО.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема исследуемого бизнес-процесса. Процесс начинается с написания аналитиком технического задания (ТЗ) на доработку существующего или разработку нового функционала какой-либо из программных систем. После того как написание ТЗ завершено, аналитик отправляет его на согласование заказчику. После согласования ТЗ заказчиком руководитель разработки по данной задаче передает аналитику информацию о разработчике, который будет выполнять разработку по данному ТЗ. Аналитик, в свою очередь, указывает имя разработчика в ТЗ и передает ТЗ разработчику для выполнения. После изучения ТЗ разработчик ПО приступает к написанию кода в рамках поставленных в ТЗ подзадач. По завершении кодирования он формирует дистрибутив (набор исходных кодов программных компонентов) и передает его на проверку корректности реализации (ревью) одному из своих коллег — другому ЛПР, компетентному в области разрабатываемой (или дорабатываемой) программной системы. После успешного прохождения ревью разработанный функционал отправляется на тестирование его работоспособности и проверку соответствия требованиям ТЗ. На этапах ревью и тестирования программный код может многократно отправляться на доработку разработчику, если были выявлены какие-либо недочеты или ошибки в разработанном функционале. Данный процесс повторяется до тех пор, пока компонент ПО не будет полностью соответствовать требованиям ТЗ и успешно протестирован. После этого компонент отправляется на внедрение в промышленную эксплуатацию.

В качестве инструментов контроля над выполнением процесса в данном случае могут использоваться электронная почта (в частности, MS Outlook) и система ведения задач Atlassian Jira либо их аналоги.

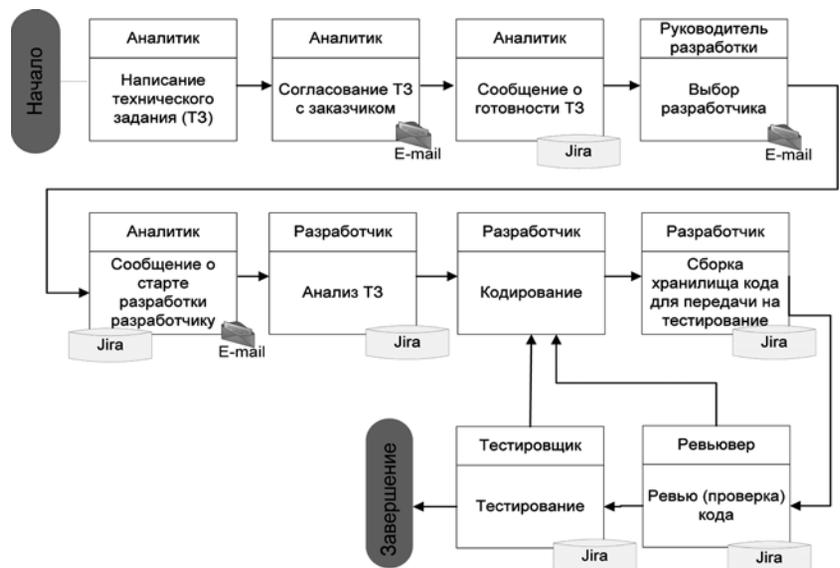


Рис. 1. Процесс разработки программного обеспечения

Данный процесс имеет следующие недостатки:

- задачи распределяются между исполнителями (разработчиками ПО) руководителем разработки на основании его предыдущего опыта работы с исполнителями, его профессиональных компетенций в области управления персоналом, способности адекватно оценивать исполнителей и личного отношения к исполнителям, что приводит к субъективной оценке исполнителей, так как в данном случае на принятие решений существенное влияние оказывает человеческий фактор. Другими словами, руководитель разработки при распределении задач руководствуется не конкретным и полным набором фактов, например ретроспективными статистическими данными о ходе и результатах выполнения исполнителями задач, а своим субъективным мнением о конкретном исполнителе. В связи с тем, что на объектах исследования на постоянной основе происходит ротация специалистов между командами и проектами, субъективное мнение руководителя разработки может негативно сказаться на качестве планирования работ;
- подзадачи распределяются без учета их фактической сложности, что может привести к некорректной оценке и срыву сроков выполнения общей задачи;
- отсутствует подход к оценке эффективности процесса разработки ПО: нет показателей, по которым можно оценить эффективность процесса и скорректировать динамику его выполнения;
- отсутствует оценка качества процесса разработки — может быть оценен только его результат (разработка завершена, не завершена, либо завершена с ошибками), качество же выполнения самого процесса не оценивается, что не позволяет корректировать его в ходе выполнения в целях уменьшения числа ошибок и повышения качества конечного результата;
- процесс подвержен существенному влиянию человеческого фактора, а также других случайных (слабопредсказуемых) факторов, в контуре управления процессом отсутствуют "инструменты" для минимизации негативных последствий и повышения качества управления процессом для обеспечения качества его результатов, т. е. получаемого программного продукта или функционала.

Для устранения указанных недостатков процесса разработки ПО необходимо решить следующие задачи:

- определить пути повышения "прозрачности" процесса разработки;
- оптимизировать распределение задач по исполнителям (аналитикам, разработчикам, специалистам по тестированию) с учетом сложности задач и производительности ресурсов;
- минимизировать время выполнения задач;

- минимизировать время бездействия ресурсов в целях более эффективного выполнения процесса;
- минимизировать вероятность ошибок и вероятность факта исключения ПО из процесса внедрения в промышленную эксплуатацию;
- разработать инструмент для прогнозирования времени выполнения задач, числа инцидентов (дефектов) и исключения их из процесса внедрения в промышленную эксплуатацию для принятия решений по корректированию процесса разработки ПО в ходе его выполнения.

Актуальность решения данных задач обусловлена тем, что существующие системы и подходы к управлению процессами аналогичного типа либо обеспечивают поддержку управления только оценкой компетенций исполнителей [1], либо обеспечивают только учет показателей выполнения процесса [2], либо позволяют оценивать исполнителей и эффективность выполнения процесса [3–4], но не позволяют генерировать и сравнивать разные стратегии управления (управленческие решения) и принимать обоснованные решения по выбору наилучшей в существующих ограничениях, а также учитывать влияние на процесс человеческого фактора. Предлагаемый подход направлен на устранение указанных недостатков существующих подходов. Также существуют стандартизированные подходы к оценке качества процесса разработки программных продуктов, наиболее популярными из которых являются единый стандарт оценки программных процессов ISO/IEC 15504, стандарт ISO 9001:2000 и ГОСТ Р ИСО 9126. Тем не менее, ни один из вышеупомянутых подходов не дает возможности провести интегрированную оценку качества управления процессом разработки ПО в интересах повышения его эффективности.

Метод решения

Предложенный авторами подход получен путем изучения преимуществ и недостатков известных подходов к управлению процессом разработки, а состав используемых метрик выработан на основе экспертной оценки от специалистов отрасли разработки ПО, имеющих опыт руководства и управления процессами разработки промышленного ПО.

Для повышения эффективности управления процессом разработки ПО были выполнены следующие шаги.

1. Разработаны метрики для оценки эффективности (производительности) ресурсов.
2. Разработаны метрики для оценки сложности задач.
3. Разработаны метрики качества выполнения задач.
4. Создана имитационная модель (ИМ) процесса разработки ПО для прогнозирования времени выполнения задач, числа инцидентов (дефектов) и исключения из внедрения в промышленную экс-

плуатацию для принятия решений по изменению процесса разработки ПО.

Метрика для оценки эффективности ресурса.

Ресурсом является сотрудник, существуют следующие типы ресурсов: *A* — аналитик, *P* — разработчик, *T* — специалист по тестированию. Эффективность ресурса является универсальной метрикой и рассчитывается для ресурсов типа *A*, *P* и *T* одинаково. При этом считается, что ресурс всегда задействован для выполнения задач только по одному направлению деятельности организации, т. е. для выполнения задач в рамках одного типового для ресурса множества задач, по которым ресурс имеет необходимые компетенции (например, только разработка веб-приложений или только разработка программных модулей баз данных). Компоненты метрики эффективности ресурса: время выполнения задач (оценивается коэффициентом K_B); факт выполнения задач (оценивается коэффициентом K_3); число ошибок (оценивается коэффициентом K_O); экспертная оценка эффективности ресурса (оценивается коэффициентом $K_Э$). На объекте исследования существуют инструментальные средства подсчета данных метрики, также данные метрики влияют на оценку результативности работы специалиста и включены в систему мотивации.

Показатель эффективности ресурса любого из имеющихся типов (*A*, *P* и *T*) включает в себя перечисленные компоненты. Эффективность ресурса $\mathcal{E} = [0; 1]$, где большее значение считается лучшим, рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = (K_B + K_3 + K_O + K_Э)/4, \quad (1)$$

где K_B — коэффициент эффективности ресурса по времени выполнения успешно завершенных аналогичных задач (задач, лежащих в рамках профессиональных компетенций исполнителя, например задач по разработке веб-приложений или задач по разработке программных модулей баз данных и т.п.); K_3 — коэффициент эффективности ресурса по выполнению задач; K_O — коэффициент, отражающий безошибочность данного ресурса относительно других ресурсов; $K_Э$ — коэффициент, отражающий экспертную оценку эффективности ресурса.

Коэффициент эффективности ресурса по времени выполнения аналогичных задач

$$K_B = 1 - (T_{\text{ya.ср}}/T_{\text{з.ср}}), \quad (2)$$

где $T_{\text{з.ср}} = (T_{\text{зy}} - T_{\text{пр}})/Z_y$ — среднее время выполнения ресурсом успешно завершенных задач; Z_y — число успешно завершенных ресурсом задач; $T_{\text{зy}}$ — суммарное время выполнения ресурсом успешно завершенных задач; $T_{\text{пр}}$ — суммарное время простоя при выполнении ресурсом успешно завершенных задач; $T_{\text{ya.ср}} = (T_{\text{зy.a}} - T_{\text{пр.a}})/Z_{y.a}$ — среднее время выполнения ресурсом успешно завершенных аналогичных задач; $Z_{y.a}$ — число успешно завершенных ресурсом аналогичных задач; $T_{\text{зy.a}}$ — суммарное

время выполнения ресурсом успешно завершенных аналогичных задач; $T_{\text{пр.a}}$ — суммарное время простоя при выполнении ресурсом успешно завершенных аналогичных задач; $K_B = [0; 1]$, большее значение считается лучшим.

Коэффициент эффективности ресурса по выполнению задач:

$$K_3 = [(Z_c + aZ_d + bZ_{\text{п}} + cZ_{\text{н}})/Z] - 0,5, \quad (3)$$

где Z_c — число задач, завершенных в срок; Z_d — число задач, завершенных досрочно; $Z_{\text{п}}$ — число просроченных, но завершенных задач; $Z_{\text{н}}$ — число незавершенных задач; Z — общее число связанных с ресурсом задач; $a = 1,5$ — вариативный повышающий (бонусный) коэффициент, увеличиваемый за выполнение задач досрочно; $b = 0,8$ — вариативный понижающий (штрафной) коэффициент, уменьшаемый за выполнение задач после срока; $c = 0,5$ — вариативный понижающий (штрафной) коэффициент, уменьшаемый за невыполнение задач; $K_3 = [0; 1]$, большее значение считается лучшим. Значения коэффициентов a , b и c выбирались экспертным путем и таким образом, чтобы обеспечить достаточное для практических целей расстояние между получаемыми значениями коэффициента эффективности ресурса (3) для разных ресурсов в случае наличия у них завершенных досрочно, просроченных или невыполненных задач. Значения данных коэффициентов являются вариативными и могут быть скорректированы в рамках применения данной метрики к конкретному бизнес-процессу.

Коэффициент, отражающий безошибочность данного ресурса относительно других ресурсов:

$$K_O = 1 - (O_p/O_c), \quad (4)$$

где O_p — общее число ошибок данного ресурса по всем выполненным им ранее задачам; O_c — общее число ошибок, допущенное всеми ресурсами в сумме по всем выполненным ими задачам; $K_O = [0; 1]$, большее значение считается лучшим.

Коэффициент, отражающий экспертную оценку эффективности ресурса:

$$K_Э = (C + K + 3H)/300, \quad (5)$$

где $C = [0; 100]$ — оценка скорости выполнения ресурсом задач; $K = [0; 100]$ — оценка качества выполнения ресурсом задач; $3H = [0; 100]$ — оценка знаний и опыта ресурса, причем если экспертных оценок несколько, то вычисляется среднее арифметическое по ним; $K_Э = [0; 1]$, где большее значение считается лучшим.

Метрика для оценки сложности задачи. Каждая задача имеет свой тип (T_3): 0 — задача неопределенного типа; 1 — <название типа 1>; 2 — <название типа 2>; 3 — <название типа 3>; ... n — <название типа n >; ... N_{T_3} (число типов задач). Метрика применима для всех N_{T_3} типов задач.

Коэффициент сложности задачи рассчитывается как

$$C_3 = (K_3^{\text{труд}} + K_3^{\text{вр}} + K_3^{\text{сл}} + K_3^{\text{о}} + K_3^{\text{огрв}} + K_3^{\text{огрр}} + K_3^{\text{э}})/N_k, \quad (6)$$

где $K_3^{\text{труд}}$ — коэффициент сложности по трудоемкости задачи; $K_3^{\text{вр}}$ — коэффициент сложности по времени выполнения задачи; $K_3^{\text{сл}}$ — коэффициент сложности задачи в соответствии с классом сложности; $K_3^{\text{о}}$ — коэффициент сложности по числу возможных ошибок; $K_3^{\text{огрв}}$ — коэффициент сложности по ограничениям на время выполнения задачи; $K_3^{\text{огрр}}$ — коэффициент сложности по ограничениям на ресурсы; $K_3^{\text{э}}$ — коэффициент сложности в соответствии с экспертной оценкой; N_k — число компонентов метрики сложности задачи; коэффициент $C_3 = [0; 1]$ — чем больше его значение, тем сложнее задача.

Коэффициент трудоемкости (рутинности) задачи

$$K_3^{\text{труд}} = (O_3^T + D_3^T)/2, \quad (7)$$

где $O_3^T = K_{T3}/K$ — основная трудоемкость задачи; K_{T3} — среднее число строк кода для задачи данного типа; K — среднее число строк кода по всем задачам; $D_3^T = P_{T3}/P$ — дополнительная трудоемкость задачи; P_{T3} — среднее число правок ошибок в коде для задачи данного типа; P — среднее число правок ошибок в коде по всем задачам; $K_3^{\text{труд}} = [0; 1]$, большее значение означает большую трудоемкость (рутинность) задачи.

Коэффициент сложности задачи по времени выполнения

$$K_3^{\text{вр}} = B_{T3}^{\text{вр}}/B, \quad (8)$$

где $B_{T3}^{\text{вр}}$ — суммарное время выполнения задач данного типа; B — суммарное время выполнения всех задач (всех типов); $K_3^{\text{вр}} = [0; 1]$, большее значение означает большую сложность задачи.

Возможные классы сложности задач: 1 — сложная; 2 — средней сложности; 3 — простая; $N_{\text{кл}}$ — число имеющихся классов сложности задач. Коэффициент для определения сложности задачи в соответствии с классом сложности рассчитывается по формуле

$$K_3^{\text{сл}} = \left[N_{\text{кл}} - \frac{KL_{\text{ТА}}}{KL} \right] / 3, \quad (9)$$

где $KL_{\text{ТА}} = \max\{KL_1^a, KL_2^a, \dots, KL_n^a\}$ — наиболее встречаемый в статистической выборке класс сложности для задач данного типа; $KL_1^a, KL_2^a, \dots, KL_n^a$ — множество n классов сложности аналогичных задач данного типа; $KL = \max\{KL_1, KL_2, \dots, KL_m\}$ — наиболее часто встречаемый класс сложности в статистической выборке по всем задачам; KL_1, KL_2, \dots, KL_m — множество m классов сложности задач лю-

бого типа; 3 — общее число задач любого типа; $K_3^{\text{сл}} = [0; 1]$ — большее значение означает более высокий класс сложности задачи.

Коэффициент, отражающий сложность задачи по числу возможных ошибок

$$K_3^{\text{о}} = O_{\text{ак}}/O_c, \quad (10)$$

где $O_{\text{ак}}$ — среднее число ошибок по задачам аналогичного типа и класса сложности; O_c — общее число ошибок по всем задачам; $K_3^{\text{о}} = [0; 1]$ — чем он больше, тем больше вероятность появления ошибки в текущей задаче.

Коэффициент сложности по ограничениям на время выполнения задачи

$$K_3^{\text{огрв}} = P_{\text{ср}}^{\text{ва}}/B_{\text{ср}}^a, \quad (11)$$

где $P_{\text{ср}}^{\text{ва}} = B_{\text{ср}}^a - B_{\text{ц}}$ — отклонение от среднего времени выполнения аналогичной задачи; $B_{\text{ср}}^a = B_a/3_a$ — среднее время выполнения аналогичных задач в днях; B_a — суммарное время выполнения аналогичных задач; 3_a — число аналогичных задач; $B_{\text{ц}}$ — целевое время выполнения задачи, установленное заказчиком или руководителем в днях. Коэффициент $K_3^{\text{огрв}} = [0; 1]$, если его рассчитанное значение положительно, и равно нулю, если его рассчитанное значение отрицательно; чем больше $K_3^{\text{огрв}}$, тем ограничение сильнее (быстрее нужно выполнить задание).

Коэффициент сложности по ограничениям на ресурсы

$$K_3^{\text{огрр}} = P_{\text{ср}}^{\text{ра}}/P_{\text{ср}}^a, \quad (12)$$

где $P_{\text{ср}}^{\text{ра}} = P_{\text{ср}}^a - P_{\text{ц}}$ — отклонение от среднего числа ресурсов для аналогичной задачи; $P_{\text{ср}}^a$ — среднее число ресурсов для аналогичной задачи (число человек); $P_{\text{ср}}^a = P_a/3_a$ — суммарное число ресурсов в аналогичных задачах (число человек); 3_a — число аналогичных задач; $P_{\text{ц}}$ — имеющееся число ресурсов, установленное заказчиком или руководителем (число человек). Если полученное по формуле (12) значение коэффициента $K_3^{\text{огрр}}$ отрицательно, то он принимается равным нулю, если же полученное по формуле (12) значение коэффициента положительно, то он принимается равным этому полученному значению, таким образом, значение коэффициента всегда принадлежит интервалу $[0; 1]$; чем больше $K_3^{\text{огрр}}$, тем ограничение сильнее (меньше рабочей силы имеется для выполнения задачи).

Коэффициент, отражающий экспертную оценку сложности задачи, определяется формулой

$$K_{\text{эс}} = (T + B + \text{ЭК})/3, \quad (13)$$

где $T = [0; 100]$ — оценка трудоемкости задачи; $B = [0; 100]$ — оценка времени выполнения задачи; $\text{ЭК} = [0; 100]$ — оценка эффективности команды, назначенной на выполнение задачи. Если эксперт-

ных оценок счетное множество, вычисляется среднее по ним; $K_{эс} = [0; 1]$ — чем он больше, тем задача сложнее.

Метрика качества выполнения задач. Данная метрика рассчитывается по каждой задаче после ее завершения. Компонентами метрики являются оценка времени выполнения задачи $O_{вв}$; оценка числа ошибок в задаче $O_{ош}$; оценка превышения ограничений по ресурсам при выполнении задачи $O_{ор}$; экспертная оценка качества выполнения задачи O_3 .

Качество выполнения задачи $K_{вз}$ рассчитывается как

$$K_{вз} = (-1)(O_{вв} + O_3 + O_{ор} - O_3), \quad (14)$$

где $O_{вв}$ — оценка времени выполнения задачи; O_3 — оценка числа ошибок в задаче; $O_{ор}$ — оценка превышения ограничений по ресурсам при выполнении задачи; O_3 — экспертная оценка выполнения задачи. Коэффициент $K_{вз}$ выражается натуральным числом, отражающим качество выполнения задачи:

- для задач высокого качества $K_{вз} \rightarrow +\infty$;
- для задач низкого качества $K_{вз} \rightarrow -\infty$.

Оценка, отражающая отклонение по времени выполнения задачи:

$$O_{вв} = [(T_{ф}^B / T_{п}^B) - 1] \cdot 100 \%, \quad (15)$$

где $T_{ф}^B$ — фактическое время выполнения задачи; $T_{п}^B$ — плановое время выполнения задачи. Коэффициент $O_{вв} = [-N; N]$, где N — натуральное число, отражающее отклонение от плана, выраженное в процентах: если $O_{вв}$ положительно, то оно отражает долю задержки по времени выполнения задачи в % от планового времени выполнения задачи; если $O_{вв}$ отрицательно, то оно отражает долю выигрыша по времени выполнения задачи в % от планового времени выполнения задачи; если $O_{вв}$ равно нулю, то задача выполнена точно в установленный срок.

Оценка числа ошибок в задаче $O_{ош}$ принимается равной числу ошибок, допущенных в процессе выполнения задачи, в натуральном выражении: $O_{ош} = [0; N]$, где N — максимально возможное число ошибок в одной задаче.

Оценка, отражающая отклонение по ресурсам при выполнении задачи:

$$O_{ор} = [(N_{ф}^P / N_{п}^P) - 1] \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где $N_{ф}^P$ — число фактически задействованных в задаче ресурсов; $N_{п}^P$ — число ресурсов, выделенных для выполнения задачи в соответствии с планом; $O_{ор} = [-N; N]$, где N — натуральное число, отражающее отклонение от плана в %. Если $O_{ор}$ положительно, то оно отражает превышение числа ресурсов в % от объема выделенных на задачу ресурсов; если отрицательно, то оно отражает число неиспользованных ресур-

сов в % от объема выделенных на задачу ресурсов; если равно нулю, то задача выполнена с использованием в точности того числа ресурсов, которое под нее выделено; если ограничения на ресурсы отсутствуют, то $O_{ор}$ также равно нулю.

Экспертная оценка качества выполнения задачи:

$$O_3 = (T_3 + N_{ош} + K_3) / N_K, \quad (17)$$

где $T_3 = [0; 100]$ — оценка серьезности последствий из-за превышения плановых сроков выполнения задачи; $N_{ош} = [0; 100]$ — оценка серьезности последствий от найденных в задаче ошибок; $K_3 = [0; 100]$ — оценка качества выполнения задачи; $N_K = 3$ — число компонентов данной экспертной оценки. Если экспертных оценок счетное множество, то вычисляется среднее по ним; $O_3 = [0; 100]$ в %.

Применение метрик

На основе предложенных метрик для каждого ресурса рассчитывается его эффективность, для каждой задачи — ее сложность.

Оценка эффективности ресурса включает в себя оценку скорости выполнения задач, оценку опыта исполнителей в выполнении аналогичных задач и оценку качества выполнения задач.

Оценка сложности задачи включает в себя оценку времени выполнения задачи, оценку трудоемкости и нетривиальности задачи, а также оценку числа возможных ошибок в задаче. Для каждой задачи автоматически подыскивается ресурс (или несколько ресурсов), способный (способные) выполнить ее наиболее эффективно (за меньшее время, с минимумом ошибок и максимумом качества) (рис. 2). При этом задачи для исполнителей различны по целям и сложности, но подыскиваются из пула однотипных задач, связанных с одним и тем же направлением деятельности организации, по которому исполнитель ведет разработку на постоянной основе, т. е. по которому исполнитель имеет необходимые компетенции. Далее предлагается моделировать выполнение каждой задачи назначенными на предыдущем шаге ресурсами в ИМ [5–6].

Результатами ИМ являются пессимистичный, ожидаемый и оптимистичный прогнозы следующих параметров:

- прогнозное время выполнения каждой задачи;
- прогнозное время бездействия каждого ресурса;



Рис. 2. Пример подбора ресурсов на задачи по коэффициентам эффективности ресурсов и сложности задач

Пример прогноза в разрезе задач, полученного в ИМ

| ID задачи | Исполнители | Прогноз времени выполнения задачи, дней | | | Прогноз числа ошибок в задаче, шт. | | | Прогноз исключения из релиза, вероятность в % | | | Прогноз числа инцидентов/дефектов, шт. | | |
|-----------|---------------|---|-----------|----------------|------------------------------------|-----------|----------------|---|-----------|----------------|--|-----------|----------------|
| | | оптимистичный | ожидаемый | пессимистичный | оптимистичный | ожидаемый | пессимистичный | оптимистичный | ожидаемый | пессимистичный | оптимистичный | ожидаемый | пессимистичный |
| 1 | Иванов И. В. | 9 | 13 | 18 | 7 | 14 | 22 | 7 | 11 | 14 | 2 | 5 | 9 |
| 2 | Сидоров И. У. | 15 | 22 | 27 | 12 | 21 | 34 | 16 | 24 | 28 | 6 | 9 | 10 |
| 3 | Петров С. Б. | 5 | 10 | 12 | 3 | 9 | 18 | 3 | 8 | 9 | 0 | 2 | 5 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Таблица 2

Пример прогноза в разрезе ресурсов, полученного в имитационной модели

| ID задачи | Исполнители | Прогноз времени бездействия ресурса, часы | | | | | |
|-----------|---------------|---|------------|------------|------------|------------|-----|
| | | Без доп. задач | + Задача 4 | + Задача 5 | + Задача 6 | + Задача 7 | ... |
| Задача 1 | Иванов И. В. | 39 | 17 | 3 | 29 | 36 | ... |
| Задача 2 | Сидоров А. М. | 54 | 32 | 18 | 45 | 12 | ... |
| Задача 3 | Петров В. В. | 27 | 22 | 15 | 6 | 19 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

- прогнозное число ошибок, допущенных в процессе выполнения задачи;
- прогноз исключения задачи из релиза;
- прогноз числа инцидентов (дефектов) после внедрения.

Это позволяет: прогнозировать эффективность работы ресурсов и качество выполнения задач; назначать ресурсам дополнительные задачи на время их бездействия; исследовать различные варианты развития процесса разработки ПО в динамике на основе прогноза (пессимистичного, ожидаемого и оптимистичного), а также готовить план действий для каждого варианта еще до его наступления в реальности, минимизируя тем самым затраты и издержки; оценивать и предотвращать риски, связанные с ошибками при выполнении (внедрении) задач, исключением из процесса внедрения в промышленную эксплуатацию и т.д.

Отметим, что данный подход реализуется за счет того, что ИМ процесса разработки ПО позволяет строить прогнозы результатов выполнения процесса, зная только ретроспективные данные о задачах и ресурсах. Иными словами, ИМ фактически позволяет найти функцию (закономерность), которая преобразует "входы" процесса разработки ПО в его "выходы" (если представлять процесс разработки ПО как модель "черного ящика"), с учетом влияния на процесс случайных факторов (в том числе человеческого фактора), и получить на основе найденной закономерности варианты исхода процесса разработки ПО — пессимистичный, ожидаемый и оптимистичный прогнозы результатов выполнения процесса.

Предлагаемая ИМ строит прогноз в разрезе задач и в разрезе ресурсов. Пример прогноза в разрезе задач представлен в табл. 1; пример прогноза

в разрезе ресурсов — в табл. 2. На рис. 3 представлен алгоритм предлагаемого подхода.

Расчет метрик выполняется в автоматическом режиме автоматизированной программной системой, собирающей статистические данные о ходе выполнения процесса разработки ПО на всех его стадиях. Для ИМ результатов выполнения процесса также используется собираемая статистика. Процесс ИМ выполняется автоматически, в той же автоматизированной системе, где проводится расчет метрик.

Выводы

В рамках данного исследования авторами разработан подход к повышению эффективности управления процессом разработки программного обеспечения. Предложенный подход обеспечивает оценку сложности выполняемых в рамках исследуемого бизнес-процесса задач, а также оценку эффективности работы исполнителей, что позволяет находить для каждой новой задачи того исполнителя, который справится с ней наилучшим образом — максимально быстро и эффективно. Также подход позволяет прогнозировать ход выполнения процесса разработки ПО, оценивать на основе результатов прогноза эффективность принимаемых решений и выбирать для реализации только те управленческие решения, которые имеют максимально положительный эффект для процесса разработки.

Применение предложенного подхода — выработанных метрик и имитационной модели — в качестве инструментария при управлении процессом разработки ПО позволяет повысить эффективность его функционирования и обоснованность принимаемых решений.

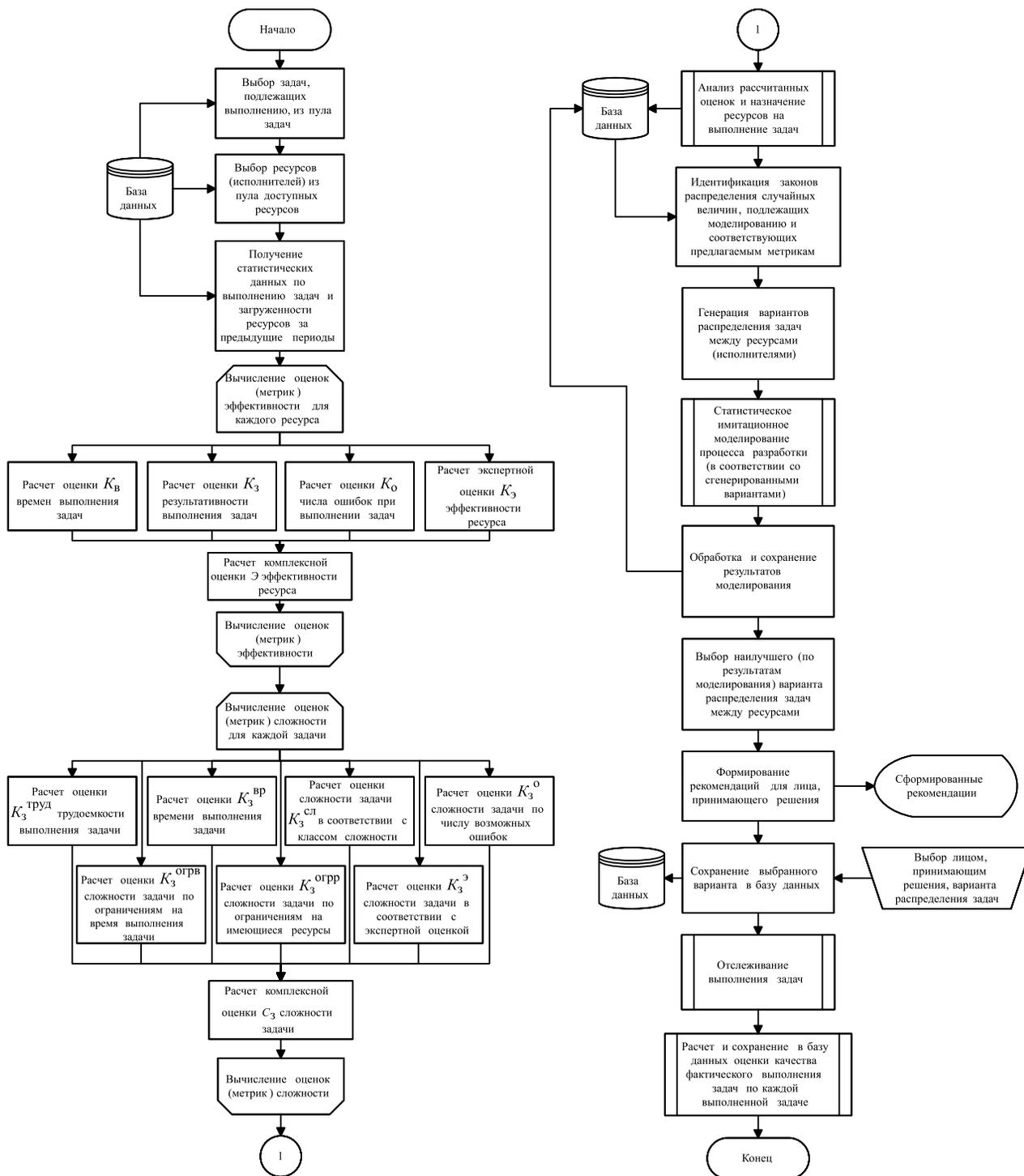


Рис. 3. Алгоритм применения предлагаемого подхода к управлению процессом разработки ПО

Список литературы

1. Система управления персоналом. Патент RU 80046 № 2007118251/22; заявл. 17.05.07; опубл. 20.01.09, бюл. № 2.
2. Интегрированная система планирования, контроля и учета для управления проектами и хозяйственной деятельностью. Патент RU 51763 № 2005133183/22; заявл. 28.10.05; опубл. 27.02.06, бюл. № 6.
3. Система управления проектами. Патент RU 47114 № 2005102201/22; заявл. 31.01.05; опубл. 10.08.05, бюл. № 22.

4. Автоматизированная система сбора и обработки данных о персонале компании. Патент RU 59860 № 2005104284/22; заявл. 17.02.05; опубл. 27.12.06, бюл. № 36.
5. Димов Э. М., Маслов О. Н., Пчеляков С. Н., Скворцов А. В. Новые информационные технологии: подготовка кадров и обучение персонала. Ч. 2. Имитационное моделирование и управление бизнес-процессами в инфокоммуникациях. Самара: Изд. СНЦ РАН, 2008. 350 с.
6. Ануфриев Д. П., Димов Э. М., Маслов О. Н., Трошин Ю. В. Статистическое имитационное моделирование и управление бизнес-процессами в социально-экономических системах, Астрахань: Изд. АИСИ, 2015. 365 с.

R. V. Tretyakov, Head of Department, e-mail: tretyakovrv@gmail.com,
AO "SberTech",

Je. M. Dimov, Professor, e-mail: e.m.dimov@gmail.com, **O. N. Maslov**, Professor, e-mail: maslov@psati.ru,

R. R. Khalimov, Assistant Professor, e-mail: khalimov@bk.ru,

Povoljskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, 443010, Russia

Software Development Process Management Improvement Based on Mathematical Models and Simulation Modeling Technology

In the article the questions of increase of efficiency of management of the non-deterministic software development processes considered, which are under significant influence of the human factor. As the mechanisms to improve this processes the processes management technique proposed by the authors, which is based on developed mathematical models and statistical simulation modeling technology. Developed mathematical model includes a set of metrics (a set of evaluation criteria) to measure the development process implementation and a quality of work of its participants (performers), enabling you to get an objective assessment of the current state of the managing process from the point of view of management of the development process and make informed decisions of correcting the process in a timely manner. Once obtained various management decisions for adjust the controlled process, these decisions are input to a statistical simulation model to simulate and evaluate with predetermined criteria their impact on the controlled process in order to select the best solution in the current operating conditions of the controlled process. Usage of the results that was obtained in a statistical simulation allows the management to minimize a possible risks and negative human factor influence in the decision-making process. Described in the article results, approaches and tools have been applied to the software development process in a large IT-company engaged in software development, and allowed it to ensure improvement of the controlled development processes management efficiency by minimizing the impact of the human factor on the management processes, minimize the risks and make more informed and timely management decisions.

Keywords: software development process management, management improvement, simulation modeling

References

1. **Sistema** upravleniya personalom: pat. 80046 Ros. Federacija N 2007118251/22; zajavl. 17.05.07; opubl. 20.01.09, Bjul. no. 2 (in Russian).

2. **Integririvannaja** sistema planirovanija, kontrolja i ucheta dlja upravlenija projektami i hozjajstvennoj dejatel'nost'ju: pat. 51763 Ros. Federacija N 2005133183/22; zajavl. 28.10.05; opubl. 27.02.06, Bjul. no. 6 (in Russian).

3. **Sistema** upravlenija projektami: pat. 47114 Ros. Federacija N 2005102201/22; zajavl. 31.01.05; opubl. 10.08.05, Bjul. no. 22 (in Russian).

4. **Avtomatizirovannaja** sistema sbora i obrabotki dannyh o personalne kompanii: pat. 59860 Ros. Federacija N 2005104284/22; zajavl. 17.02.05; opubl. 27.12.06, Bjul. no. 36 (in Russian).

5. **Dimov Je. M., Maslov O. N., Pcheljakov S. N., Skvorcov A. B.** *Novye informacionnye tehnologii: podgotovka kadrov i obuchenie personala. Chast' 2. Imitacionnoe modelirovanie i upravlenie biznes-processami v infokommunikacijah.* Samara: "Izdatel'stvo SamNC RAN", 2008, 350 p. (in Russian).

6. **Anufriev D. P., Dimov Je. M., Maslov O. N., Troshin Ju. V.** *Statisticheskoe imitacionnoe modelirovanie i upravlenie biznes-processami v social'no-jekonomicheskikh sistemah,* Astrahan', Izd-vo Astrahanskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta, 2015. 365 p.

УДК 517.9

Н. Н. Светушков, канд. техн. наук, доц., e-mail: svetushkov@mail.ru,

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Интегральное описание процесса теплопередачи для численного моделирования высокоскоростной закалки прокатных валков

Описывается новый подход, который был применен для численного моделирования процессов теплопередачи при высокоскоростной закалке прокатных валков. Несмотря на то что существует большое число численных методов для решения задачи теплопроводности, основанных на конечных разностях и конечных элементах, все они обладают определенными недостатками, главным из которых является невозможность оценить точность численного решения (используются лишь качественные оценки по шагу сеточного разбиения). Приведены полученные интегральные уравнения, описывающие процесс теплопередачи в двумерном случае в средах с изменяющимися теплофизическими характеристиками и граничными условиями второго рода. Искомые функциями в этих уравнениях являются производные от плотностей тепловых потоков по соответствующим направлениям, а функция распределения температуры вычисляется путем их интегрирования по времени.

Подход, основанный на интегральных уравнениях теплопередачи, позволяет, с одной стороны, использовать сходящиеся итерационные процедуры для нахождения численного решения, в том числе и для задач, в которых теплофизические характеристики материала зависят от температуры, а с другой — оценивать точность вычислений по вектору расхождения в каждой точке сеточного разбиения. Важным преимуществом полученных интегральных уравнений является отсутствие необходимости согласования непрерывности температур и тепловых потоков на границе раздела различных сред, что актуально для задач с фазовыми и структурными изменениями. Представлены результаты численного моделирования, выполненного в разработанной автором программной среде, позволяющей создавать сложные геометрические объекты, задавать начальные и граничные условия для нестационарной задачи теплопроводности и отображать полученные результаты в виде цветowych карт.

Ключевые слова: численное моделирование, уравнения теплопроводности, интегральное описание, термообработка, точность расчетов

Введение

Тепловые процессы относятся к наиболее распространенным физическим процессам, которые выступают как определяющие при работе различных систем и механизмов, включая двигатели, а также при разработке новых материалов, когда от условий термической обработки (закалки) зависят эксплуатационные характеристики конечного изделия.

В настоящее время, характеризующееся широким применением вычислительной техники практически во всех областях технического конструирования, важное место занимают задачи, позволяющие на этапе проектирования использовать методы математического моделирования различных физических процессов и, в частности, тепловых. Это связано, в первую очередь, с возможностью ускорить процесс разработки и конструирования технических изделий и заранее просчитать значения различных физических величин, существенным образом влияющих на конструкцию изделия. Задачи расчета температурных полей и тепловых нагрузок часто встречаются в технических задачах и представляют значительный интерес, особенно в условиях, когда их значение является критическим для работоспособности конструкции в целом или может значительно влиять на характеристики сплава или рабочего поверхностного слоя изделия (например, жаропрочность или износостойкость) в материаловедении.

При создании новых авиационных и ракетных двигателей важной характеристикой является температура продуктов сгорания, от которой зависят мощность двигателя и тепловые нагрузки на стенки как сопловой части, так и собственно камеры сгорания. Априорное знание этих величин позволяет уже на этапе конструирования разработать надежные системы охлаждения и выбрать подходящие жаростойкие покрытия, защищающие стенки двигателя.

В настоящее время большое значение имеет разработка новых жаропрочных и жаростойких сплавов, а также сплавов, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики — износостойкость и прочность. Эти характеристики во многом зависят от структуры материала — размера и количества упрочняющей мелкодисперсной фазы, что может, в том числе, контролироваться и тепловы-

ми режимами на этапах закалки и отпуска. Разработка математической модели процессов структурообразования в зависимости от температурных режимов позволит, вообще говоря, заранее предсказать рабочие характеристики сплава и выбрать наиболее подходящие способы термической обработки. Отметим, что процессы теплопередачи в условиях термической обработки осложняются изменением теплофизических характеристик материала изделия, образованием и ростом частиц новой фазы, теплофизические свойства которой также меняются. Учет меняющихся свойств материалов может быть осуществлен путем применения различных итерационных алгоритмов, для которых должны выполняться условия сходимости. Однако, как известно, при использовании методов конечных разностей итерационные схемы часто хорошо сходятся на крупномасштабных сеточных разбиениях, а уменьшение шага сетки может привести к расходимости метода. Но самой большой проблемой остается оценка точности получаемых численных результатов. Не случайно выполненные расчеты, если есть возможность, сравниваются с экспериментальными данными.

Все оценки точности как для методов конечных разностей, так и для методов конечных элементов, как известно, определяются качественно шагом сеточного разбиения и разделяются на методы первого или более высокого порядков точности и позволяют говорить об оценке ошибки лишь по порядку величины шага используемого разбиения.

Интегральные уравнения, в отличие от дифференциальных, обладают свойствами, которые позволяют их использовать для получения более адекватных численных результатов [1—3]. Во-первых, найденное численное решение можно подставить в исходное уравнение и проверить выполнение равенства между левой и правой частями (с помощью численного интегрирования, которое может быть выполнено с высокой точностью, например, методами Ньютона—Котеса). По значению расхождения в каждой точке сеточной области можно судить об ошибке численного решения. Во-вторых, оператор интегрирования, в отличие от дифференциального, является ограниченным, и, сле-

довательно, можно выбрать такие итерационные параметры, которые обеспечивают сходимость итерационных методов решения независимо от шага сеточного разбиения. Конечномерный оператор дифференцирования также обладает нормой, но при уменьшении шага разбиения эта норма неограниченно возрастает. Это часто ведет к тому, что итерационные процедуры в этом случае хорошо сходятся на крупноразмерных сеточных разбиениях и могут расходиться в случае уменьшения шага. В-третьих, интегральный подход на этапе дискретизации приводит к неявным или явно-неявным схемам, которые являются устойчивыми, и, следовательно, мы гарантированно можем найти численное решение независимо от пространственных размеров изделия и временного интервала.

В данной работе для описания процессов теплопередачи при термообработке [4] используются интегральные уравнения, которые получены как развитие используемых ранее подходов [5—9]. Ранее в качестве неизвестных функций выступали плотности тепловых потоков, что позволяло получить интегральные уравнения лишь в одномерном случае. В настоящей работе в качестве неизвестных функций выступают производные от плотностей тепловых потоков по соответствующим осям, для которых могут быть выведены интегральные уравнения как в двумерном, так и в трехмерном случаях. После того как найдено численное решение этих уравнений, функция распределения температур вычисляется путем численного интегрирования.

Интегральные уравнения для описания процесса теплопередачи

Классическая постановка задачи теплопроводности в двумерном случае в виде уравнений в частных производных выглядит следующим образом:

$$c\rho \cdot \partial u / \partial t = \partial / \partial x (k_x \partial u / \partial x) + \partial / \partial y (k_y \partial u / \partial y) + q \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями второго рода (когда на границе заданы тепловые потоки):

$$\begin{aligned} u(x, y, t)|_{t=0} &= u_0; \\ W|_{\Gamma} &= w_{\Gamma}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u = u(x, y, t)$ — функция температуры; $u_0 = u_0(x, y)$ — начальное распределение температурных полей; $k_x = k_x(x, y, u)$ — теплопроводность вдоль оси x ; $k_y = k_y(x, y, u)$ — теплопроводность вдоль оси y ; $c = c(x, y, u)$ — удельная теплоемкость; $\rho = \rho(x, y, u)$ — плотность, зависящая от пространственной переменной и температуры; $q = q(x, y, t)$ — функция распределения тепловых источников (плотность мощности); w_{Γ} — плотность теплового потока, заданная в каждой точке границы области решения задачи.

Вывод интегральных уравнений основан на том, что вместо неизвестной функции температуры вводятся новые функции (в двумерном случае их две,

а в трехмерном — три), которые имеют физический смысл пространственной производной плотности теплового потока по каждой из осей координат:

$$\begin{aligned} S_x &= (1/c\rho) \partial / \partial x (k_x \partial u / \partial x) - f_y; \\ S_y &= (1/c\rho) \partial / \partial y (k_y \partial u / \partial y) - f_x. \end{aligned} \quad (3)$$

Объединяя (3) с уравнением (1), можно получить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} S_x = (1/c\rho) \partial / \partial x (k_x \partial u / \partial x) - f_y; \\ S_y = (1/c\rho) \partial / \partial y (k_y \partial u / \partial y) - f_x; \\ \partial u / \partial t = S_x + S_y + f_x + f_y + q/c\rho. \end{cases} \quad (4)$$

Из последнего уравнения (4) функция температуры может быть найдена путем интегрирования по времени введенных ранее неизвестных функций S_x и S_y :

$$u = u_0 + \int_0^t S_x dt + \int_0^t S_y dt + \int_0^t f_x dt + \int_0^t f_y dt + \int_0^t q/c\rho dt. \quad (5)$$

Для того чтобы в дальнейшем упростить форму записи, введем следующие обозначения для операторов интегрирования по пространственным переменным:

$$\begin{aligned} \int_0^t g(t) dt &\equiv \int_0^t g dt; \\ \int_x^{\bar{x}} f(x) dx &\equiv \int_{\downarrow}^{\uparrow} f dx; \\ \int_{\bar{x}}^x f(x) dx &\equiv \int^{\uparrow} f dx; \\ \int_x^{\bar{x}} f(x) dx &\equiv \int^{\uparrow}_{\downarrow} f dx, \end{aligned} \quad (6)$$

где x — текущее значение пространственной переменной; \underline{x} — левая (или нижняя) граница интервала интегрирования; \bar{x} — правая (или верхняя) граница интервала интегрирования.

Ниже приведена выведенная автором система интегральных уравнений в двумерном случае, которая выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} u_0 + \int_0^t S_x dt + \int_0^t S_y dt + \int_0^t \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho S_y dy / \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho dy + \\ + (w_y^{\uparrow} - w_{\downarrow y}) / \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho dy \} dt + \int_0^t q/c\rho dt = \\ = 0,5 \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} r_x^{\uparrow} / k_x - \int^{\uparrow} r_x^{\uparrow} / k_x \} \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho S_x dx dx - \\ - 0,5 \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} r_{\downarrow x} / k_x - \int^{\uparrow} r_{\downarrow x} / k_x \} \int^{\uparrow} c\rho S_x dx dx + \\ + 0,5 w_{\downarrow x} \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} r_x^{\uparrow} / k_x dx - \int^{\uparrow} r_x^{\uparrow} / k_x dx \} + \\ + 0,5 w_x^{\uparrow} \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} r_{\downarrow x} / k_x dx - \int^{\uparrow} r_{\downarrow x} / k_x dx \}; \\ u_0 + \int_0^t S_y dt + \int_0^t S_x dt + \int_0^t \{ \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho S_x dx / \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho dx + \\ + (w_x^{\uparrow} - w_{\downarrow x}) / \int_{\downarrow}^{\uparrow} c\rho dx \} dt + \int_0^t q/c\rho dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,5\{\int_{\downarrow} r_y^{\uparrow}/k_y - \int_{\uparrow} r_y^{\uparrow}/k_y\} \int_{\downarrow} c\rho S_y dy dy - \\
&- 0,5\{\int_{\downarrow} r_{\downarrow y}/k_y - \int_{\uparrow} r_{\downarrow y}/k_y\} \int_{\uparrow} c\rho S_y dy dy + \\
&+ 0,5w_{\downarrow y}\{\int_{\downarrow} r_y^{\uparrow}/k_y dy - \int_{\uparrow} r_y^{\uparrow}/k_y dy\} + \\
&+ 0,5w_y^{\uparrow}\{\int_{\downarrow} r_{\downarrow y}/k_y dy - \int_{\uparrow} r_{\downarrow y}/k_y dy\}, \quad (7)
\end{aligned}$$

где введены функции:

$$\begin{aligned}
r_x^{\uparrow} &= \int_{\uparrow} c\rho dx / \int_{\downarrow} c\rho dx; \quad r_{\downarrow x} = \int_{\downarrow} c\rho dx / \int_{\downarrow} c\rho dx; \\
r_y^{\uparrow} &= \int_{\uparrow} c\rho dy / \int_{\downarrow} c\rho dy; \quad r_{\downarrow y} = \int_{\downarrow} c\rho dy / \int_{\downarrow} c\rho dy, \quad (8)
\end{aligned}$$

а для функций f_x и f_y выполняются равенства

$$\begin{aligned}
f_y &= 1/\int_{\downarrow} c\rho dx \int_{\downarrow} c\rho S_x dx + (w_x^{\uparrow} - w_{\downarrow x})/\int_{\downarrow} c\rho dx; \\
f_x &= 1/\int_{\downarrow} c\rho dy \int_{\downarrow} c\rho S_y dy + (w_y^{\uparrow} - w_{\downarrow y})/\int_{\downarrow} c\rho dy. \quad (9)
\end{aligned}$$

В полученных уравнениях функции w_x^{\uparrow} и $w_{\downarrow x}$ определяют проекции граничных величин тепловых потоков w_T в концевых точках интервалов интегрирования на ось x , а w_y^{\uparrow} и $w_{\downarrow y}$ — на ось y .

Заметим, что каждое из двух интегральных уравнений (7) содержит две пространственные переменные и одну временную. По пространственным переменным уравнения можно отнести к типу Фредгольма (второго рода), а по временной переменной — к типу Вольтера (второго рода).

Заметим, что итерационные методы позволяют эффективно решать различные нелинейные задачи, причем в случае интегральных уравнений появляется возможность следить за уменьшением вектора рассогласования (невязки) на каждом шаге итерации и останавливать расчеты при достижении ею заданного значения. Применение итерационного алгоритма для решения уравнений теплопроводности позволяет не только обеспечить требуемую точность, но и единым образом решить как линейные, так и нелинейные задачи, включая задачи, в которых граничные тепловые потоки пропорциональны температуре поверхности (граничные условия третьего рода).

Отметим, что в случае интегральных уравнений теплопроводности дополнительным преимуществом является отсутствие необходимости согласовывать непрерывность температуры и тепловых потоков на границе раздела различных сред. Таким образом, интегральные уравнения значительно упрощают задачу численного определения температурных полей в геометрически сложных изделиях, имеющих неоднородные включения, которые встречаются при решении задач с фазовыми или структурными превращениями.

Результаты численного моделирования процесса высокоскоростной заковки

Для решения задач теплопередачи была разработана специализированная программная среда, в которой пользователь может задать вид объекта, число временных слоев, начальные и граничные условия, меняющиеся с течением времени, и выполнить решение нестационарной задачи теплопроводности на основе описанных выше интегральных уравнений.

В работе для исследования был выбран процесс высокоскоростной заковки прокатных валков [4] в целях выбора наиболее подходящих условий термообработки. Несмотря на то что скоростная высококачественная заковка прокатных валков технологически реализована на многих предприятиях (в основном за рубежом), остается вопрос о повышении срока службы отдельного валка. Это связано с тем, что его замена в прокатном стане является довольно трудоемкой и дорогостоящей операцией. Варьируемыми параметрами при заковке являются мощность индуктора, обеспечивающего подвод теплоты, горизонтальная скорость его перемещения, определяющие толщину прогреваемого слоя и распределение температуры, а также теплофизические характеристики подаваемого охладителя, область подачи и скорость потока, определяющие условия отвода теплоты, и, соответственно, скорость охлаждения поверхностного слоя валка и др.

Модель валка была задана в осесимметричной системе координат и показана на рис. 1. Общее число расчетных точек: по радиусу валка — 30, по длине — 40. Выбраны следующие параметры, которые определяют конфигурацию валка: R_0 — радиус посадочной оси, R_{0v} — внешний радиус посадочной оси, R_v — внешний радиус валка, L_v — длина рабочей части валка, L_s — длина посадочной оси.

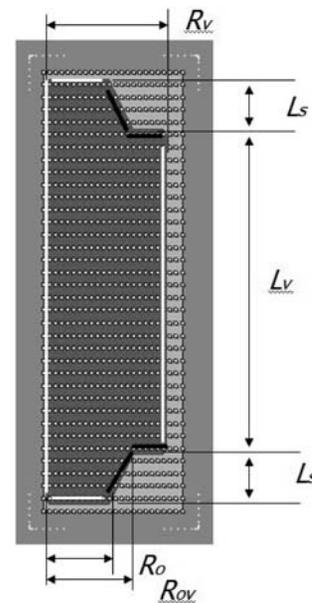


Рис. 1. Двумерная осесимметричная модель прокатного валка

Как известно, с понижением температуры ниже точки аустенизации в стали происходят изменения, приводящие к распаду аустенитной структуры с образованием зерен различной структуры — мартенситной, перлитной или бейнитной. С точки зрения моделирования процесса передачи теплоты необходимо знать теплофизические характеристики каждой из этих структур. Для стали (для тех областей, которые предварительно были нагреты выше температуры аустенизации), состоящей из аустенита и перлитной (мартенситной) смеси, коэффициент теплопроводности λ можно определить исходя из правила смеси:

$$\lambda = \lambda_{\gamma} V_{\gamma} + \lambda_{\alpha} V_{\alpha}, \quad (10)$$

где V_{γ} — объемное содержание упрочняющей фазы (мартенситной структуры); $V_{\alpha} = (1 - V_{\gamma})$ — объемное содержание в стали α -фазы (аустенита). Для того чтобы получить приближенную зависимость, описывающую содержание остаточного аустенита, можно использовать распределение Гиббса, определяющее концентрацию частиц по энергиям в зависимости от температуры:

$$f = A \exp(-E/kT). \quad (11)$$

Используя распределение Гиббса, можно вполне обоснованно предположить, что скорость роста упрочняющей фазы также определяется аналогичной зависимостью:

$$dV_{\gamma}/dt = A \exp(-E_{кр}/k|T - T_a|), \quad (12)$$

где T_a — температура аустенизации; $E_{кр}$ — энергия образования зародыша критического размера; k — постоянная Больцмана; A — коэффициент, связанный со свойствами конкретного сплава или стали.

Измеренные коэффициенты теплоемкости для аустенита и перлитных структур незначительно отличаются друг от друга и слабо зависят от температуры. Зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от температуры для инструментальной стали ШХ15, для которой были проведены расчеты, были аппроксимированы линейными функциями:

$$\begin{aligned} \lambda_{\gamma} &= 14,9 + 0,0153 T; \\ \lambda_{\alpha} &= 42,1 - 0,0193 T; \\ C_{\gamma} &= 450 + 0,167 T, \end{aligned} \quad (13)$$

где C_{γ} — удельная теплоемкость при постоянном объеме. Для задачи охлаждения на поверхности, контактирующей с воздухом или с водой, учитывался теплообмен по закону Ньютона:

$$W_w = K_{air, water}(T_c + T_{п}), \quad (14)$$

где $K_{air, water}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи, а T_c и $T_{п}$ — температуры среды и поверхности. В таблице приведены значения параметров, использованных при расчетах.

Размеры модели и теплофизические параметры, использованные при расчетах

| Геометрические размеры | Значения, мм | Теплофизические параметры | Значения |
|------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|
| L_v | 2000 | W_w | 3000 КВт/м ² |
| R_v | 800 | K_{air} | 2000 Вт/м ² ·К |
| L_s | 250 | K_{water} | 30000 Вт/м ² ·К |
| R_o | 300 | T_0 | 540 °С |
| R_{ov} | 350 | T_{air} | 20 °С |

Индукционный нагрев моделировался путем задания постоянного теплового потока в выделенной части на поверхности валка — в области расположения движущегося индуктора. Скорость движения индуктора задавалась постоянной и равной 0,1 м/с.

Процесс аустенизации сопровождается поглощением теплоты, что учитывалось путем ввода распределенных стоков теплоты в поверхностном слое в уравнении. При охлаждении удельная теплота перлитного, бейнитного и мартенситного превращений равнялись соответственно 66,7, 56,3 и 31,3 кДж/кг.

При термической обработке прокатных валков различают однопроходный и многопроходный методы нагрева. Их различие состоит в том, что при многопроходном нагреве можно увеличить толщину прогреваемого слоя. Действительно, модельные расчеты однопроходного нагрева, приведенные на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки), показывают, что в конечном положении перемещения индуктора толщина прогретой зоны в начальной точке увеличилась несмотря на общее охлаждение непосредственно с поверхности. Таким образом, дополнительный проход из начального положения позволяет прогреть выше температуры аустенизации слой большей толщины.

Для поверхностной закалки часто используется одновременный индукционный нагрев и охлаждение с помощью движущегося спреера. На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) показаны результаты расчетов однопроходной закалки, когда за движущимся индуктором на некотором расстоянии движется спреер, под давлением подающий на поверхность валка поток воды с заданным расходом. Охлаждение с помощью воды учитывалось путем задания соответствующего коэффициента теплоотдачи в выделенной области воздействия спреера.

Расчетные данные (рис. 4, см. четвертую сторону обложки) показывают, что максимальная температура нагрева находится в средней части индуктора (960 °С) и резко падает до 100 °С в области подачи воды, причем за спреером образуется расширяющийся "шлейф" с пониженной (меньше 400 °С) температурой. Таким образом, в области, показанной на рис. 4, сталь подвергается высоким скоростям охлаждения, приводящим к образованию мартенситной структуры упрочняющего слоя. Однако можно отметить, что после прохождения спреера

поверхность вновь нагревается за счет запасенной в глубоких слоях заготовки тепловой энергии. Используя полученные расчетные данные, можно рассчитать размеры области высоких градиентов температур, а также скорректировать движения спеера в целях уменьшения скорости охлаждения и увеличения времени воздействия для недопущения самоотпуска (перегрева) закаленной области в процессе перемещения спеера.

Заключение

Интегральные уравнения, которые использовались для решения задачи термообработки прокатного валка, позволили на крупноразмерной сетке получить решения с хорошей инженерной точностью (на основе оценки по вектору рассогласования), что составляло менее 1 %. В качестве численного метода решения использовался итерационный алгоритм, позволяющий на каждом шаге улучшать сеточное решение. Скорость сходимости для выбранной задачи составила менее 50 итераций на каждом временном слое.

Применение интегрального описания при численном моделировании позволило избежать возникновения "нефизических" осцилляций в численном решении в областях с высоким градиентом температур, а также обеспечило возможность найти решение достаточно высокого качества за приемлемое вычислительное время (~5 минут на обычном ПК).

Предложенный метод численного моделирования может быть рекомендован для решения различных технических задач материаловедения, включая задачи, в которых меняются теплофизические свойства материала, а также задачи, в которых необходимо учитывать условия непрерывности температур и тепловых потоков на границе раздела сред.

Список литературы

1. Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения. Задачи и примеры с подробными решениями. Изд. четвертое. М.: URSS, Ком. Книга. 2007, 190 с.
2. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев, Наукова Думка, 1986, 544 с.
3. Hackbusch W. Integral Equations: theory and numerical treatment. Basel — Boston — Berlin, Birkhauser Verlag, 1995, 361 p.
4. Гедон М. В., Соболев Г. П., Паисов И. В. Термическая обработка валков холодной прокатки. М.: Металлургия, 1973. 344 с.
5. Светушков Н. Н. Возможности компьютерного моделирования технологических процессов термической обработки // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: www.mai.ru/science/trudy/.
6. Светушков Н. Н. Метод струн в задачах многомерной нестационарной теплопроводности // Информационные технологии. 2014. № 12. С. 14—19.
7. Светушков Н. Н. Параллельный метод струн для численного решения нелинейных задач теплопроводности // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 689—693.
8. Светушков Н. Н. Применение интегрального метода струн для расчета тепловых нагрузок на охлаждаемые стенки сопловой части ракетного двигателя // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 1. С. 32—36.
9. Svetushkov N. N. Iterative method for the numerical solution of a system of integral equations for the heat conduction initial boundary value problem // 11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications" IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 158. 2016. 012091 doi:10.1088/1757-899X/158/1/012091. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/158/1/012091>

N. N. Svetushkov, Ph. D., Associate Professor, e-mail: svetushkov@mai.ru
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russia

Integral Description of the Heat Transfer Process for Numerical Modeling High-Speed Hardening of Rolling Rolls

The article describes a new approach that has been applied to numerical modeling of heat transfer processes in the high-speed hardening of rolling rolls. Despite the fact that there are a large number of numerical methods for solving the heat conduction problem based on finite differences and finite elements, all of them have certain drawbacks, the main one of which is the impossibility to estimate the accuracy of the numerical solution (only qualitative estimates are used for the magnitude of the grid-partition step). The paper presents the integral equations obtained, which describe the heat transfer process in the two-dimensional case in media with changing thermophysical characteristics and boundary conditions of the second kind. The required functions in these equations are the derivatives of the heat flow densities in the corresponding directions, and the temperature distribution function is calculated by integrating them over time. The approach based on integral heat transfer equations allows one, on the one hand, to use convergent iterative procedures to find a numerical solution, including for problems in which the thermophysical characteristics of the material depend on temperature, and on the other hand, to estimate the accuracy of the computation along the error vector in each The grid decomposition point. An important advantage of the integral equations obtained is that there is no need to reconcile the continuity of temperatures and heat fluxes at the interface of different media, which is important for problems with phase and structural changes. The article presents the results of numerical modeling performed in the software environment developed by the author, which allows: creating complex geometric objects, defining initial and boundary conditions for the non-stationary heat conduction problem, and displaying the results in the form of color maps.

Keywords: numerical modeling, heat transfer equations, integral description, heat treatment, accuracy

References

1. Krasnov M. L., Kiselev A. I., Makarenko G. I. *Integral'nihe uravneniya. Zadachi i primerih s podrobniymi resheniyami*. Moscow, URSS, Kom. Kniga, 2007, 190 p. (in Russian).
2. Verlanj A. F., Sizikov V. S. *Integral'nihe uravneniya: metodih, algoritmi, programmih*. Kiev, Naukova Dumka, 1986, 544 p. (in Russian).
3. Hackbusch W. *Integral Equations: theory and numerical treatment*. Basel, Boston, Berlin, Birkhauser. International series of numerical mathematics. 1995, vol. 120, 361 p.
4. Gedeon M. V., Sobolj G. P., Paisov I. V. *Termicheskaya obrabotka valkov kholodnoy prokatti*, Moscow, Metallurgiya, 1973, 344 p. (in Russian).
5. Svetushkov N. N. Vozmozhnosti kompjyuternogo modelirovaniya tekhnologicheskikh processov termicheskoy obrabotki, Trudih MAI, Moscow, 2012, no. 58, available at: www.mai.ru/science/trudy/ (in Russian).
6. Svetushkov N. N. Metod strun v zadachakh mnogomernoy nestacionarnoy teploprovodnosti, *Informacionnihe tekhnologii*, 2014, no. 12, pp. 14–19 (in Russian).
7. Svetushkov N. N. Parallelniy metod strun dlya chislennogo resheniya nelineynihkh zadach teploprovodnosti, *Informacionnihe tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 689–693 (in Russian).
8. Svetushkov N. N. Primenenie integral'nogo metoda strun dlya rascheta teplovihkh nagruzok na okhlazhdaemihe stenki soplovyj chasti raketnogo dvigatelya, *Informacionnihe tekhnologii*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 32–36 (in Russian).
9. Svetushkov N. N. Iterative method for the numerical solution of a system of integral equations for the heat conduction initial boundary value problem, *11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications"* IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 158, 2016. 012091 doi:10.1088/1757-899X/158/1/012091, available at: <http://iop-science.iop.org/1757-899X/158/1/012091>

УДК 004.942

В. Н. Гридин¹, д-р техн. наук, проф., науч. руководитель,
Н. Г. Рыжов², канд. техн. наук, доц., зав. каф.,
В. И. Анисимов^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: vianisimov@inbox.ru,
М. М. Абухазим², аспирант,

¹Центр информационных технологий в проектировании РАН, г. Одинцово

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Методы повышения эффективности процессов моделирования динамических режимов нелинейных систем

Рассматриваются методы повышения эффективности процессов расчета динамических режимов нелинейных систем. Приводится математическое описание нелинейных схем в динамическом режиме на основе формирования и решения уравнений схемы в неявной алгебро-дифференциальной форме. Описывается методика построения дискретных моделей частотно-зависимых компонентов моделируемой схемы на основе использования неявных методов Гира высших порядков. Приводится блок-схема расчета динамических режимов нелинейных систем, содержащая цикл временной дискретизации и цикл линеаризации для решения нелинейных уравнений с помощью схмотехнической интерпретации алгоритма Ньютона—Рафсона. Даны описание основных методов компактного хранения и обработки разреженных матриц и сравнительная оценка эффективности сжатия данных на их основе. Отмечается, что для практической реализации высокоэффективного программного обеспечения моделирования динамических режимов нелинейных систем представляет интерес метод индексно-адресных матриц, позволяющий наиболее просто привести программное обеспечение к требуемой компактной форме, и метод списковых схем Кнута, имеющий наибольшие возможности для сканирования матриц в произвольном направлении.

Ключевые слова: системы автоматизации схмотехнического проектирования, моделирование систем, дискретные модели компонентов, компактная обработка, разреженные матрицы

Введение

Актуальной проблемой в области дальнейшего развития систем автоматизированного проектирования является реализация компактных методов обработки разреженных матриц, что позволяет существенно повысить эффективность программного обеспечения систем. Эта задача особенно актуальна при построении систем с распределенной архитектурой, когда информационные ресурсы предоставляются потребителям посредством сетевых

сервисов [1–3], поскольку при этом существенно повышаются требования к быстродействию программного обеспечения. Поэтому при создании систем автоматизации схмотехнического проектирования необходимо использовать методы, основанные на формировании компактного описания моделируемой системы с выбранным способом сжатия данных, что повышает производительность обработки нулевых элементов в математическом описании системы. Такая задача актуальна для всех подсистем схмотехнических САПР, однако

особенно значимой она является при построении наиболее сложной подсистемы моделирования нелинейных схем в динамическом режиме.

Существующие методы компактной обработки разреженных матриц значительно отличаются своей эффективностью, и поэтому для правильного выбора метода сжатия данных необходимо выполнить сравнительную оценку таких методов, которая и дается в настоящей работе. В качестве критериев оценки приняты следующие:

а) возможность введения в компактное описание дополнительных элементов, неизбежно появляющихся в процессе решения уравнений;

б) коэффициент сжатия данных $\beta = M/M_1$, где M — объем памяти, требуемый для полного описания разреженной матрицы; M_1 — объем памяти, требуемый для компактного описания разреженной матрицы.

Математическое описание нелинейных схем в динамическом режиме

Исходные уравнения для расчета динамических режимов нелинейных схем могут быть построены на основании описания схемы в модифицированном базисе узловых потенциалов, с предварительным выделением в группу y -полюсов всех двухполюсников типа C , а в группу z -полюсов всех двухполюсников типа L , и описанием всех частотно-зависимых управляемых источников уравнениями в неявной форме. В результате после замены оператора s символом дифференцирования можно получить алгебро-дифференциальное уравнение моделируемой схемы в виде

$$F(\dot{X}, X, t) = 0. \quad (1)$$

Полагая $t = t^{k+1}$, получим

$$F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) может быть выполнено на основании известных явных и неявных методов высших порядков [4, 5], которые имеют различные точность и степень устойчивости, при этом высшую степень устойчивости обеспечивает неявный метод Гира, обобщенная формула для которого может быть записана в виде

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^m a_j^H X^{k+1-j} + h b_0^H \dot{X}^{k+1}, \quad (3)$$

где $h = t^{k+1} - t^k$.

Входящие в эту формулу коэффициенты a_j^H и b_0^H для методов второго и третьего порядков определяются следующими значениями:

$$\text{для } m = 2 \quad a_1^H = 4/3, \quad a_2^H = 1/3, \quad b_0^H = 2/3;$$

$$\text{для } m = 3 \quad a_1^H = 8/11, \quad a_2^H = -9/11, \quad a_3^H = 2/11, \\ b_0^H = 6/11.$$

Чтобы исключить вектор первой производной из неявного уравнения (2), найдем значение этого вектора на основании обобщенной формулы Гира (3):

$$\dot{X}^{k+1} = \frac{\alpha_0}{h} X^{k+1} + \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j X^{k+1-j}, \quad (4)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \frac{1}{b_0^H}, \quad \alpha_j = -\frac{a_j^H}{b_0^H}.$$

В результате получим нелинейное уравнение вида $F(X^{k+1}) = 0$, решая которое методом Ньютона—Рафсона, можно найти вектор X^{k+1} .

Подстановку значений производных удобнее проводить не в результирующее матричное уравнение схемы, а в компонентные уравнения для двухполюсников L и C , а также для частотно-зависимых управляемых источников и многополюсных компонентов, эквивалентные схемы которых включают в себя частотно-зависимые элементы.

С этой целью представим обобщенную формулу Гира (2) в скалярной форме:

$$\dot{x}^{k+1} = \frac{\alpha_0}{h} x^{k+1} + \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j x^{k+1-j}, \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \frac{1}{b_0^H}, \quad \alpha_j = -\frac{a_j^H}{b_0^H}.$$

Для получения дискретной модели двухполюсника типа C следует использовать компонентное уравнение

$$i_C^{k+1} = C \frac{du_C^{k+1}}{dt} = C \dot{u}_C^{k+1}. \quad (6)$$

Полагая в формуле коррекции $x = u_C$ и подставляя значение производной в уравнение (6), получим уравнение дискретной модели двухполюсника типа C :

$$i_C^{k+1} = Y_C^k u_C^{k+1} + j_C^k, \quad (7)$$

где

$$Y_C^k = \frac{\alpha_0 C}{h}, \quad j_C^k = \frac{C}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j u_C^{k+1-j}. \quad (8)$$

Для построения дискретной модели двухполосника типа L следует использовать компонентное уравнение

$$u_L^{k+1} = L \frac{di_L^{k+1}}{dt} = Li_L^{k+1}. \quad (9)$$

Полагая в выражении (5) $x = i_L$ и подставляя значение производной в уравнение (9), получим обобщенное уравнение дискретной модели двухполосника типа L :

$$u_L^{k+1} = R_L^k i_L^{k+1} + e_L^k, \quad (10)$$

где

$$R_L^k = \frac{\alpha_0 L}{h}, \quad e_L^k = \frac{L}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j i_L^{k+1-j}. \quad (11)$$

Чтобы построить дискретную модель частотно-зависимых управляемых источников, следует использовать обобщенное уравнение

$$p = w(s)q, \quad (12)$$

где p — управляемая выходная переменная; q — управляющая входная переменная; $w(s)$ — частотно-зависимая функция передачи.

В качестве типовой функции $w(s)$ примем ее следующее представление:

$$w(s) = w_0 \frac{1 + s\tau_1}{1 + s\tau_2}. \quad (13)$$

Уравнение частотно-зависимого источника в неявной форме будет иметь вид

$$p(1 + s\tau_2) = w_0 q(1 + s\tau_1).$$

После замены оператора s явным дифференцированием для момента времени $t = t^{k+1}$ получим

$$p^{k+1} + \dot{p}^{k+1} \tau_2 - w_0 q^{k+1} - w_0 \dot{q}^{k+1} \tau_1 = 0. \quad (14)$$

Значения производных можно представить формулами Гира, что на основании выражения (5) дает

$$\dot{p}^{k+1} = \frac{\alpha_0}{h} p^{k+1} + \sigma_p^k; \quad \dot{q}^{k+1} = \frac{\alpha_0}{h} q^{k+1} + \sigma_q^k,$$

где

$$\sigma_p^k = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j p^{k+1-j}, \quad \sigma_q^k = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m \alpha_j q^{k+1-j}.$$

После подстановки производных в уравнение (14) получим

$$p^{k+1} + \frac{\tau_2 \alpha_0}{h} p^{k+1} + \tau_2 \sigma_p^k - w_0 q^{k+1} - \frac{w_0 \tau_1 \alpha_0}{h} q^{k+1} - w_0 \tau_1 \sigma_q^k = 0.$$

Следовательно, можно построить обобщенное выражение для дискретных моделей частотно-зависимых управляемых источников:

$$p^{k+1} = w^k q^{k+1} + s^k, \quad (15)$$

где

$$w^k = w_0 \frac{1 + \tau_1 \alpha_0}{1 + \frac{\tau_2 \alpha_0}{h}}; \quad (16)$$

$$s^k = \frac{w_0 \tau_1 \sigma_q^k - \tau_2 \sigma_p^k}{1 + \frac{\tau_2 \alpha_0}{h}}. \quad (17)$$

Для реализации блок-схемы программного обеспечения расчета динамического режима нелинейных схем введем векторы дифференцируемых переменных I_s и U_s , а также векторы Q_f и P_f для переменных, входящих в функциональные зависимости нелинейных компонентов моделируемой схемы $P_f = F(Q_f)$.

Тогда можно построить блок-схему расчета динамического режима в виде, изображенном на рис. 1.

Блок-схема включает в себя цикл дискретизации частотно-зависимых компонентов и цикл линеаризации не-

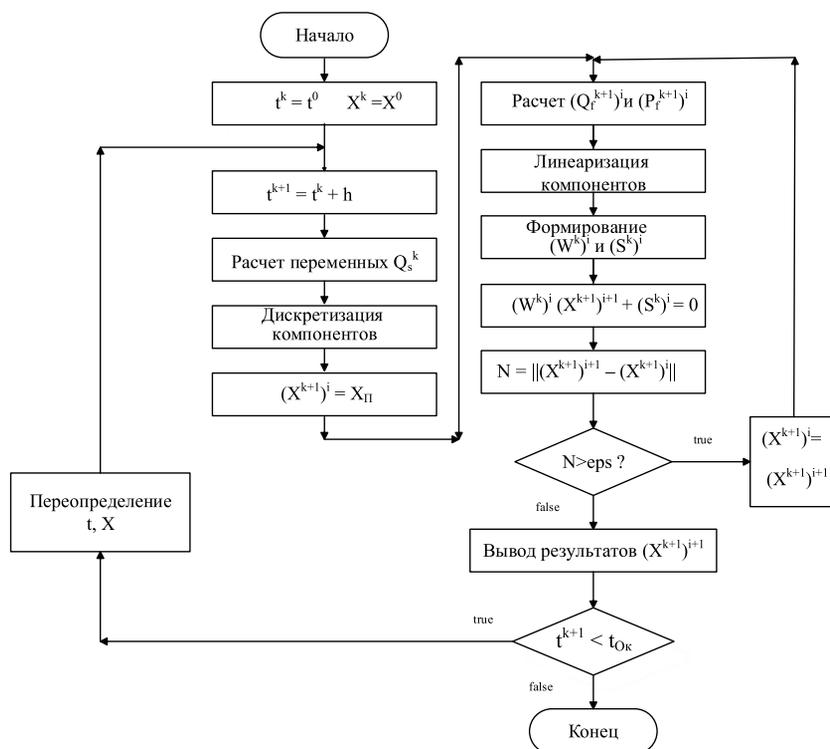


Рис. 1. Блок-схема расчета динамического режима нелинейных схем

линейных компонентов, в котором на очередном k -м шаге временной дискретизации выполняется решение линейаризованного матричного уравнения схемы

$$(W^k)^i (X^{k+1})^{i+1} + (S^k)^i = 0. \quad (18)$$

При этом на основе сформированной на i -м шаге линейаризованной матрицы $(W^k)^i$ и матрицы для задающего вектора $(S^k)^i$ вычисляется искомый вектор $(X^{k+1})^{i+1}$ для $i+1$ -го шага. Вследствие слабосвязанной структуры реальных электронных схем линейаризованные матрицы являются сильно разреженными, что существенно снижает эффективность их обработки [6, 7].

Начальное значение прогноза вектора X_{Π} для второго цикла может быть вычислено по любой формуле для явных методов. Можно принять также $X_{\Pi} = X^k$, т.е. положить это значение равным результатам расчета предыдущего временного шага.

Повышение эффективности расчета динамических режимов нелинейных схем на основе компактной обработки разреженных матриц

Переход к компактной форме обработки разреженных матриц существенно повышает эффективность программного обеспечения систем автоматизации схемотехнического проектирования и является актуальной задачей в области дальнейшего развития таких систем. Особенно актуальной такая задача становится при построении систем с распределенной архитектурой, в которой информационные ресурсы предоставляются потребителям посредством сетевых сервисов, когда требуется минимизация времени взаимодействия с системой, что может быть достигнуто путем использования методов формирования компактного описания моделируемой системы на основе выбранного способа сжатия данных. При этом повышается производительность обработки нулевых элементов в математическом описании и уменьшается время решения задачи.

Существующие методы компактной обработки разреженных матриц значительно отличаются показателями своей эффективности [8–10], и поэтому для правильного выбора метода сжатия данных необходимо провести сравнительную оценку таких методов, которая дана ниже. В таблице приведены сравнительные оценки эффективности для различных методов сжатия данных на основе компактного хранения разреженных матриц. В этой же таблице приведена численная оценка коэффициента сжатия данных для коэффициента разреженности $\alpha = 0,1$.

Известный интерес для практической реализации высокопроизводительного программного обеспечения систем автоматизации схемотехнического проектирования представляет метод индексно-адресных матриц, который, как следует из таблицы,

хотя и имеет сравнительно низкий коэффициент сжатия данных, но характеризуется чрезвычайно простой технологией реализации программного обеспечения. При этом для построения компактной формы программного обеспечения достаточно выполнить формирование индексно-адресной матрицы A , а также одномерных массивов параметров моделируемой схемы WZ и задающих источников SZ [11]. Массивы WZ и SZ целесообразно создавать как объекты класса коллекций *ArrayList*, что позволяет использовать для формирования и обработки этих массивов методы класса коллекций. Обработка данных компактных массивов WZ и SZ осуществляется на основании результатов простого сканирования индексно-адресной матрицы A , при этом относительный адрес элемента w_{ij} в массиве WZ определяется значением элемента $A(i, j)$. Использование этого метода особенно целесообразно в случаях, когда имеется программное обеспечение системы моделирования на основе полного описания разреженных матриц, так как его переработка для приведения к форме с компактной обработкой данных требует минимальных затрат трудовых ресурсов.

При построении программного обеспечения для работы с индексно-адресной матрицей необходимо решать две основные задачи. Первая задача связана с формированием компактного описания системы, вторая — с решением уравнений на основе созданного компактного описания.

С практической точки зрения массивы A , WZ и SZ удобно создавать как статические в некотором классе глобальных массивов GV .

Целью формирования компактного описания системы является занесение в массивы WZ и SZ некоторых значений, определяемых параметрами компонентов и структурой схемных связей. Так, если в компактный массив WZ необходимо занести некоторое значение z , которое в полном описании разреженной комплексной матрицы должно было бы заноситься в i -ю строку и j -й столбец этой матрицы, то при занесении в компактный массив WZ такая задача решается путем вызова функции

| Метод | Коэффициент сжатия данных | Коэффициент сжатия данных метода для $\alpha = 0,1$ |
|-----------------------------------|---------------------------|---|
| Метод индексно-адресных матриц | $\frac{1}{\alpha + 0,25}$ | 2,86 |
| Метод списковых схем Кнута | $\frac{1}{2\alpha}$ | 5 |
| Методы сокращенных схем Кнута | $\frac{1}{1,5\alpha}$ | 6,7 |
| Метод строчного формата | $\frac{1}{1,25\alpha}$ | 8 |
| Метод строчно-столбцового формата | $\frac{1}{1,1\alpha}$ | 9 |

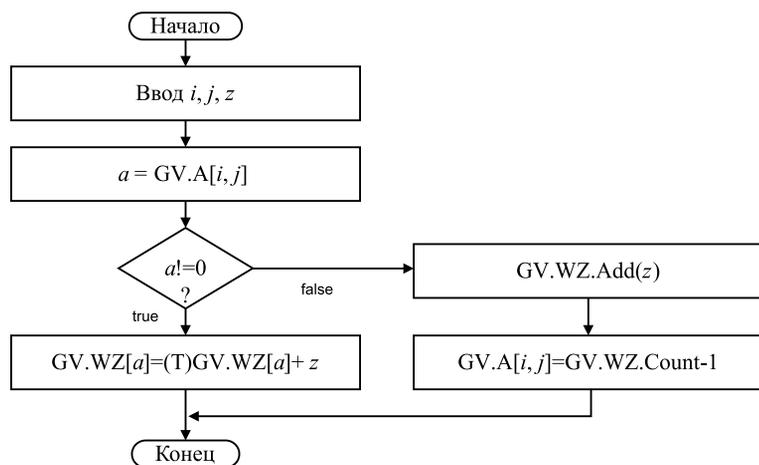


Рис. 2. Блок-схема функции формирования компактного массива WZ

$set(inti, intj, Tz)$, где $T = complex$ для частотной области и $T = double$ для временной области. Блок-схема такой функции приведена на рис. 2.

Согласно этой блок-схеме содержимое элемента $A(i, j) = a$ выводится из адресного массива, и если это значение не имеет нулевого значения, то согласно полученному относительному адресу выполняются требуемые операции с данными сжатого массива WZ (или массива SZ). Если же в адресной матрице на пересечении i -й строки и j -го столбца содержится нулевое значение, то выполняется расширение массива WZ и дополнение адресной матрицы еще одним элементом.

Массив SZ формируется согласно аналогичной блок-схеме.

При решении уравнений любым из известных методов (метод Гаусса, Гаусса-Жордано, LU-факторизация) и использовании полного описания разреженной матрицы w необходимо выполнять k -й шаг приведения к треугольной или диагональной матрице:

$$w[i, j] = w[i, j] - w[i, k] \cdot w[k, j] / w[k, k].$$

При использовании компактного описания задача нахождения элемента $w[i, j]$ в массиве WZ решается на основании содержания индексно-адресной матрицы.

Метод строчно-столбцового фиксированного формата имеет наибольшую эффективность по сравнению со всеми остальными возможными методами компактной обработки разреженных матриц. Однако поскольку формат всех массивов в этом методе жестко зафиксирован и не может меняться произвольным образом в процессе расчета, отличительной особенностью метода является невозможность включения в описание дополнительных ненулевых элементов. Это обстоятельство исключает возможность непосредственного применения методов фиксированного формата для обработки информации при решении систем уравнений любым численным методом вследствие неизбежного

появления новых ненулевых элементов в процессе этого решения. Поэтому для возможности учета новых ненулевых элементов в компактном описании моделируемой системы необходимо использовать двухэтапную процедуру формирования такого описания. Двухэтапная процедура характеризуется относительно сложной логикой построения программного обеспечения, и переход к компактному описанию является весьма трудоемким процессом.

Промежуточное положение по своей эффективности и трудоемкости реализации занимают методы списковых схем Кнута, а также сокращенные варианты основного метода Кнута.

Реализация основного метода Кнута выполняется путем построения следующих компактных массивов [8, 9]:

WZ — для значений ненулевых элементов w_{ij} исходной матрицы, которые располагаются в этом массиве по относительному адресу a , имеющему значение порядкового номера элемента в массиве WZ ;

WI — для номеров строк ненулевых элементов w_{ij} ;

WJ — для номеров столбцов ненулевых элементов w_{ij} ;

NR — для хранения относительного адреса a следующего ненулевого элемента w_{ij} строки;

NC — для хранения относительного адреса a следующего ненулевого элемента w_{ij} столбца;

ER — для хранения относительного адреса a начального элемента очередной строки;

EC — для хранения относительного адреса a начального элемента очередного столбца.

Некоторым недостатком основного метода Кнута является значительное число массивов, необходимых для хранения информации о ненулевых элементах исходной матрицы. Однако существенным достоинством этого метода является возможность записи элементов массива WZ в любом порядке и, как следствие, возможность введения в описание дополнительных ненулевых элементов, которые неизбежно появляются при решении уравнений. Следует также отметить, что классический метод Кнута позволяет сканировать исходную матрицу как по строкам, так и по столбцам, что является также достоинством метода. Сокращенные методы Кнута позволяют уменьшить число используемых массивов путем исключения из полного описания ряда массивов. При этом возможно построение сокращенного метода, который реализует сканирование лишь по строкам, для чего необходимо ввести только массивы WZ , WJ , NR , ER , и метода, реализующего сканирование только по столбцам, для чего необходимо использовать лишь массивы WZ , WI , NC , EC .

Очевидно, что эффективность сокращенной схемы Кнута выше, чем эффективность полной схемы Кнута, однако это достигается за счет ограничения возможности выбора направления скани-

рования, что является недостатком сокращенного метода Кнута. Однако возможность введения в описание дополнительных ненулевых элементов, а также произвольный порядок их записи в массиве остается в силе. Это обстоятельство является существенным достоинством сокращенного метода Кнута.

Вместе с тем практическая реализация методов Кнута связана с необходимостью полной перекодировки всех массивов при введении в описание дополнительных элементов, что связано с большими техническими трудностями в процессе построения программного обеспечения, и снижением производительности его дальнейшего функционирования. Возникающие проблемы могут быть устранены путем перехода к объектно-ориентированному подходу описания схемы Кнута на основе существующей в современных языках программирования C# и Java методики работы с коллекциями объектов класса *ArrayList*, предназначенной для поддержки динамических массивов, размеры которых могут изменяться в процессе работы. Класс *ArrayList* реализует ряд интерфейсов и, помимо свойств и методов, определенных в интерфейсах, имеет также и собственные свойства и методы [12, 13].

При этом для решения задачи построения компактного описания необходимо создание объектов *rows* и *columns* класса *ArrayList*. Каждый элемент объекта *rows* соответствует определенной строке матрицы и ссылается на ненулевой элемент в данной строке, а каждый элемент объекта *columns* соответствует определенному столбцу матрицы и ссылается на ненулевой элемент в данном столбце [14].

Описание элементов в списке задается в классе *Element*, члены которого *val*, *i*, *j* описывают значение элемента w_{ij} исходной матрицы и значения, определяющие его координаты *i*, *j*, а ссылки *nextI*, *nextJ* указывают на следующий элемент в строке и на следующий элемент в столбце соответственно.

```
class Element
{
    public double val;
    public int i;
    public int j;
    public Element nextI;
    public Element nextJ;
    public Element(double val, int i, int j)
    {
        this.val = val;
        this.i = i;
        this.j = j;
    }
}
```

Для компактного описания всей разреженной матрицы следует ввести класс *Matrix*, структура которого имеет следующей вид:

```
public class Matrix
```

```
{ Element el;
    ArrayList rows = new ArrayList();
    ArrayList columns = new ArrayList();
    public Matrix(){}
    //Методы включения в список новых элементов
    //Методы для доступа к элементам списка
}
```

Реализация методов включения в список новых элементов и методов для доступа к элементам списка базируется на использовании стандартных методов, определенных в интерфейсах класса *ArrayList*.

Аналогичным образом могут быть реализованы и сокращенные схемы Кнута.

Экспериментальное тестирование рассмотренных методов в задачах схемотехнического проектирования показывает полное совпадение результатов моделирования с приведенной выше оценкой эффективности методов компактной обработки.

Заключение

Рассмотрение методов сжатия данных на основе компактной обработки разреженных матриц позволяет сделать вывод, что наибольший интерес для практической реализации высокоэффективного программного обеспечения для расчета динамических режимов нелинейных систем представляет метод индексно-адресных матриц, позволяющий наиболее просто привести программное обеспечение к требуемой компактной форме, а также метод списковых схем Кнута, имеющий наибольшие возможности для сканирования матриц в произвольном направлении. Существенным достоинством обоих методов является возможность включения в компактное описание дополнительных ненулевых элементов, неизбежно появляющихся в процессе решения уравнений. Практическая реализация этих методов при моделировании динамических режимов нелинейных систем позволяет существенно повысить производительность работы систем автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. Гридин В. Н., Анисимов В. И. Методы построения систем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 1.
2. Гридин В. Н., Анисимов В. И., Ахмад А. Д. Построение клиентских .NET-приложений в распределенных схемотехнических САПР // Системы и средства информатики. 2016. № 1. С. 206–215.
3. Анисимов Д. А. Методы построения систем автоматизации схемотехнического проектирования на основе веб-сервисов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 10. С. 56–61.
4. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.
5. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: пер. с англ. М.: Энергия, 1980. 631 с.

6. **Диалоговые** системы схемотехнического проектирования / под ред. В. И. Анисимова. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.

7. **Гридин В. Н., Михайлов В. Б., Шустерман Л. Б.** Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. М.: Наука, 2008, 342 с.

8. **Кнут Д.** Искусство программирования для ЭВМ. Т. 1; пер. с англ. М.: Мир, 1976, 734 с.

9. **Писсанецки С.** Технология разреженных матриц: пер. с англ. М.: Мир, 1988, 406 с.

10. **Эстербю О., Златев З.** Прямые методы для разреженных матриц: пер. с англ. М.: Мир, 1987.

11. **Гридин В. Н., Анисимов В. И., Абухазим М. М.** Моделирование больших систем на основе методов декомпозиции и сжатия данных // Системы высокой доступности. 2015. № 4. С. 77–82.

12. **Троелсон Э.** Язык программирования C# 2005 и платформа.NET 2.0: пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 1167 с.

13. **Ноутон П., Шилдт Г.** Java 2: пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2001, 1072 с.

14. **Амахвр Ю. М.** Компактная обработка разреженных матриц на основе списков // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 4. С. 49–52.

V. N. Gridin¹, D. Sc., Professor, Scientific Director,
N. G. Ryzhov², Ph. D., Associate Professor, Head of Department,
V. I. Anisimov^{1, 2}, D. Sc., Professor, Chief Scientific Officer, vianisimov@inbox.ru,
M. M. Abukhazim², Graduate Student

¹Center of information technologies in design of RAS, Moscow region, Odintsovo,
 Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint-Petersburg

Methods to Boost Performance Modeling of Dynamic Modes of Nonlinear Systems

Methods of calculation performance increasing of the dynamic modes of nonlinear systems are considered. The mathematical description of nonlinear schemes is provided in the dynamic mode on the basis of forming and the solution of the equations of the scheme in an implicit algebro-differential form. The technique of creation of discrete models of frequency-dependent components of the modelled scheme on the basis of using of implicit methods of Gere of the highest orders is described. The flowchart of calculation of the dynamic modes of nonlinear systems containing a cycle of temporary sampling and a cycle of linearization for the solution of the nonlinear equations by means of circuitry interpretation of an algorithm of Nyuton—Rafson is provided. The description of the main methods of compact storage and handling of the rarefied matrixes is provided and the comparative efficiency evaluation of compression of data on their basis is given. For practical implementation of the highly effective software of modeling of the dynamic modes of nonlinear systems the article presents the method of index and address matrixes that makes it easy to bring the software to the desired compact form, and the method of list schemes of the Whip having the greatest opportunities for scanning of matrixes in any direction.

Keywords: systems of automation of circuitry designing, modeling of systems, discrete models of components, compact handling, the rarefied matrixes

Reference

1. **Gridin V. N., Anisimov V. I.** Metody postroeniya sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya na osnove Internet-tekhnologij i kompaktnoj obrabotki razrezhennyh matric, *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, 2009, no. 1.

2. **Gridin V. N., Anisimov V. I., Ahmad A. D.** Postroenie klient-skih .NET-prilozhenij v raspredelennyh skhemotekhnicheskikh SAPR", *Sistemy i sredstva informatiki*, 2016, no. 1, pp. 206–215.

3. **Anisimov D. A.** Metody postroeniya sistem avtomatizacii skhemotekhnicheskogo proektirovaniya na osnove veb-servisov, *Izvestiya SPbGETU "LETI"*. 2012, no. 10, pp. 56–61.

4. **Vlah I., Singhal K.** *Mashinnye metody analiza i proektirovaniya ehlektronnyh skhem*, per. s ang. Moscow, Radio i svyaz; 1988, 560 p. (in Russian).

5. **CHua L. O., Lin Pen-Min.** *Mashinnyj analiz ehlektronnyh skhem*; per. s ang. Moscow, Energiya, 1980, 631 p.

6. **Dialogovye sistemy skhemotekhnicheskogo proektirovaniya**, ed. V. I. Anisimov. Moscow, Radio i svyaz, 1988. 288 p.

7. **Gridin V. N., Mihajlov V. B., SHusterman L. B.** CHislenno-analiticheskoe modelirovanie radioehlektronnyh skhem, monografiya, Moscow, Nauka, 2008, 342 p.

8. **Knut D.** *Iskusstvo programmirovaniya dlya EHVM*, vol. 1, per. s angl. Moscow, Mir, 1976, 734 p.

9. **Pissaneccki C.** *Tekhnologiya razrezhennyh matric*, per. s angl., Moscow, Mir, 1988, 406 p.

10. **EHsterbyu O., Zlatev Z.** Pryamye metody dlya razrezhennyh matric, per. s angl. Moscow, Mir, 1987.

11. **Gridin V. N., Anisimov V. I., Abuhazim M. M.** Modelirovanie bol'shikh sistem na osnove metodov dekompozicii i szhatiya dannyh. *Sistemy vysokoj dostupnosti*, no. 4, 2015, pp. 77–82.

12. **Troelsson Eh.** YAzyk programmirovaniya C# 2005 i platforma.NET 2.0, per. s angl. M.: Izd. "Vil'iams" 2007, 1167 p.

13. **Nouton P., SHildt G.** Java 2, per. s angl. SPb.: Izd. "BHV-Peterburg" 2001, 1072 p.

14. **Amahvr Yu. M.** Kompaktnaya obrabotka razrezhennyh matric na osnove spiskov, *Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij*, 2008, no. 4, pp. 49–52.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 004.932.2

А. В. Терехин, канд. техн. наук, доц., e-mail: terehin_murom@mail.ru,
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", г. Муром

Алгоритм вычисления инвариантных признаков невыпуклых изображений проекций произвольно расположенных трехмерных объектов

Данное исследование связано с разработкой алгоритмов вычисления инвариантных признаков невыпуклых проекций трехмерных объектов. Приведены основные определения, алгоритм вычисления признаков, результаты исследований разработанных признаков на тестовых изображениях плоских геометрических фигур и проекциях реальных трехмерных объектов.

Ключевые слова: автоматическая система распознавания, трехмерный объект, идентификация, плоские невыпуклые изображения, диагональные признаки формы, распознавание образов, анализ изображений, диагональный отрезок, форма объекта, инвариантные коэффициенты

Введение

Повсеместное увеличение объемов производства влечет за собой внедрение автоматических конвейеров и сборочных линий. Их неотъемлемой частью являются роботизированные узлы, оборудованные техническим зрением. В качестве технического зрения выступают системы автоматического распознавания (САР). Их основными задачами являются локализация и распознавание объектов наблюдения. Точность распознавания во многом зависит от выбранного набора признаков изображений. Часто используются геометрические признаки, характеризующие изображение объекта, такие как его площадь, периметр, пераунд (нормированное отношение площади к квадрату периметра), размеры вписанного и описанного прямоугольников, длины максимального, минимального и среднего радиусов-векторов (соединяющих геометрический центр изображения объекта с его границей), значения их отношений к периметру или друг к другу, угол между максимальным и минимальным радиусами-векторами. Эти признаки, так же как и число отверстий, число углов, число выступов и т. п., инвариантны к перемещениям изображения в картинной плоскости [1], но они имеют различные единицы измерения и диапазоны значений. Это усложняет их совместное использование для решения различного рода задач. Таким образом, разработка нового вектора безразмерных инвариантных признаков формы и экспериментальное исследование его возможностей являются актуальными задачами.

Ранее автором был разработан вектор инвариантных (к смещению, повороту и масштабу объекта) признаков бинарных изображений для распознавания выпуклых проекций трехмерных объектов, включающий в себя: прямоугольный коэффициент формы (ПКФ), коэффициент периметр-площадь (КПП), диагональный коэффициент формы (ДКФ), коэффициенты диагоналей (КД), коэффициенты диагональных отрезков (КДО) выпуклых фигур [2–4]. За основу были взяты существующие геометрические признаки [1].

Есть множество подходов, алгоритмов и методов, позволяющих распознавать объекты на изображениях. Некоторые из них больше используют аппаратные возможности систем, другие опираются на программные комплексы. Так как набор объектов заранее известен, то целесообразно использовать алгоритмы распознавания, основанные на сравнении с эталонами. Наиболее подходящим для решения задачи распознавания трехмерных объектов является метод вычисления оценок. Суть метода заключается в составлении бинарной таблицы соответствия эталонов исследуемому изображению — наивысшая оценка соответствует решению о распознавании. Классический метод вычисления оценок рассматривается в работе [5]. Он был взят за основу и адаптирован автором для распознавания трехмерных объектов [6].

Так как в цифровом виде изображения представляются в виде наборов пикселей, то и геометрические характеристики объектов, присутствующих на них, будут зависеть от размеров изображения. От-

сюда и появляется необходимость в представлении признаков в виде безразмерных коэффициентов — это делает соответствующие признаки инвариантными к размерам классифицируемых изображений.

В данной работе речь пойдет о геометрических признаках формы, инвариантных к смещению, повороту и изменению масштаба изображения объекта. Кроме того, все разработанные признаки имеют общий диапазон значений от 0 до 1, что позволяет их использовать с алгоритмом вычисления оценок без дополнительной нормализации.

Определения

Для описания новых признаков необходимо ввести ряд определений.

Определение 1. *Длина проекции объекта* — отрезок c (рис. 1), который соединяет две точки, находящиеся на внешнем контуре изображения проекции и имеющий максимальную длину из возможных.

Определение 2. *Диагональные отрезки описанного вокруг проекции объекта прямоугольника* — это отрезки HN, HM, HE, HD (рис. 1), которые соединяют центр описанного прямоугольника (ОП) H и его вершины M, N, E, D .

Определение 3. *Диагональный отрезок объекта* — отрезок, который: 1) лежит на одной из диагоналей описанного вокруг проекции объекта прямоугольника; 2) соединяет его центр и точку пересечения контура проекции объекта с этой диагональю (отрезки HG, HF, HF', HG').

Определение 4. *Прямоугольный коэффициент формы (ПКФ)*, обозначается $k_{ПКФ}$ — безразмерный коэффициент, равный отношению длины меньшей стороны описанного вокруг изображения проекции объекта прямоугольника к длине большей стороны, область значений находится на интервале от 0 до 1:

$$k_{ПКФ} = \frac{l_a}{l_b}, \quad (1)$$

где l_a, l_b — длина и ширина описываемого вокруг объекта прямоугольника соответственно (рис. 2).

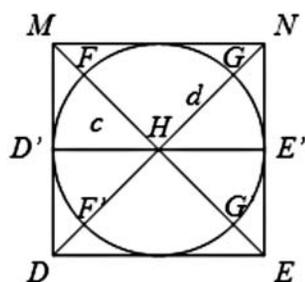


Рис. 1. Пример изображения проекции круглого объекта и описанного вокруг нее прямоугольника

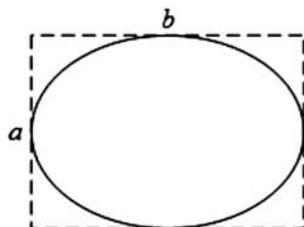


Рис. 2. Схематическое представление плоской геометрической фигуры № 1, вписанной в прямоугольник: a, b — стороны описанного прямоугольника

В зависимости от значений признака:

1) отношение ширины и длины фигуры пропорционально отношению двух сторон квадрата, если $k_{ПКФ} = 1$, если $l_a = l_b$;

2) отношение ширины и длины фигуры пропорционально отношению двух сторон прямоугольника $k_{ПКФ} \rightarrow 0$, если $l_a \gg l_b$; где a, b — стороны описанного прямоугольника.

ПКФ позволяет классифицировать проекции трехмерных объектов по их форме, например, на проекции, которые можно вписать в квадрат или в прямоугольник.

Определение 5. *Коэффициент периметр-площадь (КПП)* — это отношение периметра P_o внешнего контура объекта к его площади S_o :

$$k_{КПП} = \frac{P_o}{S_o}, \quad (2)$$

где P_o, S_o — соответственно периметр и площадь объекта.

Определение 6. *Диагональный коэффициент формы (ДКФ)* — безразмерный коэффициент, равный отношению длины проекции объекта к длине диагонали описанного прямоугольника. Для овальной проекции объекта (рис. 3) диагональный коэффициент вычисляется по следующей формуле:

$$k_{ДКФ} = \frac{l_c}{l_d}, \quad (3)$$

где l_d — длина диагонали описанного прямоугольника; l_c — длина проекции объекта.

Определение 7. *Коэффициент диагоналей (КД)* — безразмерный коэффициент, равный отношению длины диагонали проекции объекта к длине проекции объекта l_e .

Определение 8. *Диагонали объекта* — отрезки, которые лежат на диагоналях описанного вокруг проекции объекта прямоугольника и соединяют две точки контура объекта. На рис. 4 диагонали проекции объекта — FG' и $F'G$.

Обозначим их длины l_{d1} и l_{d2} .

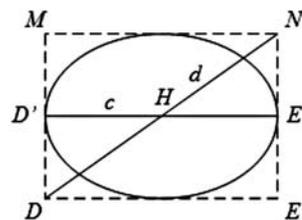


Рис. 3. Пример изображения овальной проекции объекта и описанного вокруг нее прямоугольника:

d — диагональ описанного прямоугольника; c — отрезок максимальной длины между двумя точками контура объекта

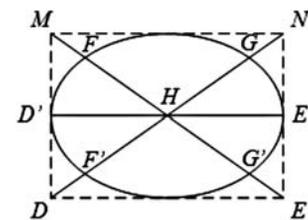


Рис. 4. Схематическое представление плоской геометрической фигуры № 2, вписанной в прямоугольник

Для вычисления КД используют следующие формулы:

$$k_{КД1} = \frac{l_{d1}}{l_e}; \quad (4)$$

$$k_{КД2} = \frac{l_{d2}}{l_e}. \quad (5)$$

Алгоритм

Пусть имеется бинарное изображение с площадным объектом M невыпуклой формы, представленным множеством точек с координатами (i, j) (рис. 5).

Вокруг площадного объекта M построен описанный прямоугольник (далее — ОП) с вершинами A, B, C, D минимально возможной площади.

В прямоугольнике $ABCD$ построены диагонали AC и BD . Они пересекают объект M в точках m'_i .

Отрезки AO, OC и BO, OD называются диагональными отрезками (ДО) описанного прямоугольника. Точки m'_i , лежащие на диагональных отрезках ОП, образуют диагональные отрезки объекта. У невыпуклых фигур диагональных отрезков объекта может быть множество (рис. 5), в отличие от выпуклых фигур, у которых их 4 (см. рис. 4), по одному на каждое направление диагонального отрезка от точки пересечения диагоналей до вершин ОП.

Пусть L — это множество точек объекта M , лежащих на отрезке; h, w — высота и ширина ОП.

$$\text{При } \alpha = \text{tg}\left(\frac{w}{h}\right):$$

L_{main} — множество точек объекта, лежащих на главной диагонали ОП,

$$L_{main} = \left\{ (x, y) \mid \begin{aligned} x &= |t \cdot \sin \alpha| + x'_0, \\ y &= y'_0 - |t \cdot \cos \alpha|, \quad 0 \leq t \leq p \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где p — длина отрезка ОП; α — угол наклона линии (которая содержит отрезок) к горизонтальной оси; t — расстояние от точки начала отрезка до текущей точки ($t = 0, 1, 2, \dots, p$); (x'_0, y'_0) — координаты начала отрезка;

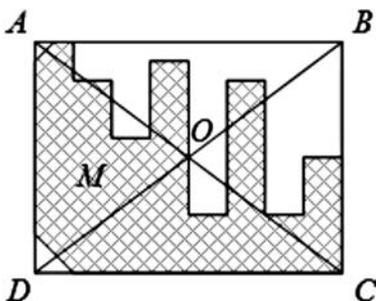


Рис. 5. Площадной объект M

L_{second} — множество точек объекта, лежащих на побочной диагонали ОП,

$$L_{second} = \left\{ (x, y) \mid \begin{aligned} x &= |t \cdot \sin \alpha| + x'_0, \\ y &= |t \cdot \cos \alpha| + y'_0, \quad 0 \leq t \leq p \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

AO и OC определяются по формуле (6):

для AO $x'_0 = x_0, y'_0 = y_0, p = \frac{1}{2}d$;

для OC $x'_0 = x_0 + \frac{w}{2}, y'_0 = y_0 + \frac{h}{2}, p = \frac{1}{2}d$,

где d — длина диагонали ОП.

Длина диагонали ОП вычисляется по теореме Пифагора:

$$d = \sqrt{h^2 + w^2}.$$

DO и OB определяются по формуле (7):

для DO $x'_0 = x_0, y'_0 = y_0 + h, p = \frac{1}{2}d$;

для OB $x'_0 = x_0 + \frac{w}{2}, y'_0 = y_0 + \frac{h}{2}, p = \frac{1}{2}d$.

Обозначим через H_{D_k} множество точек объекта, находящихся на диагональном отрезке D_k , тогда

$$H_{D_k} = M \cup L.$$

Множество L вычисляется для каждого диагонального отрезка ОП: AO, OC, DO, OB . При этом суммарная длина отрезков объекта, лежащих на каждом диагональном отрезке в точках (в пикселях), будет равна мощности соответствующего множества H_{D_k} . Предлагаемая методика позволяет учитывать выпуклость формы по количеству подмножеств в множествах L_i , где i — число диагональных отрезков.

Определение 9. Коэффициенты диагональных отрезков (КДО) — безразмерные коэффициенты, равные отношению длины диагонального отрезка проекции объекта к длине соответствующего диагонального отрезка описанного прямоугольника (см. рис. 1, отрезки HN, HM, HE, HD). Общее число коэффициентов диагональных отрезков для каждой проекции равно четырем (вычисляются для каждого диагонального отрезка).

Таким образом, коэффициенты диагональных отрезков для невыпуклых проекций трехмерных объектов можно вычислить по следующей формуле:

$$k_{DSC} = \frac{H_{D_k}}{0,5L_{main}} = \frac{2H_{D_k}}{L_{main}}. \quad (8)$$

Заключение

Для проверки разработанных алгоритмов была разработана программа для ЭВМ на основе алгоритмов из работ [2–8] и проведены исследования диагональных признаков формы на изображениях проекций реальных трехмерных объектов (рис. 6).

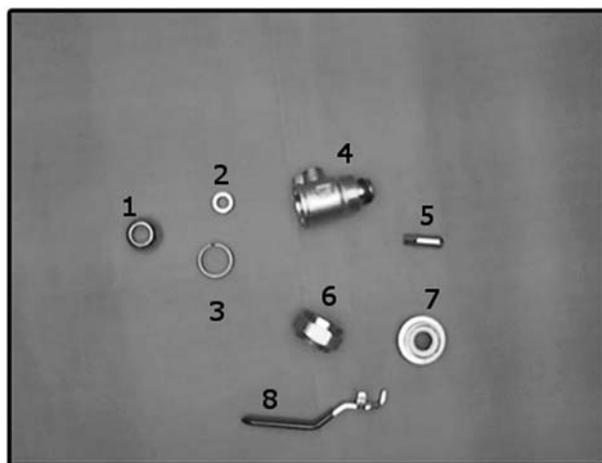


Рис. 6. Пример тестовых изображений произвольно расположенных трехмерных объектов

Для ускорения вычислений в разработанной САР трехмерных объектов планируется использовать аппаратное обеспечение, основанное на мемристорах [9–12]. Мемристор — новый нанoeлектронный элемент, используемый для аппаратной реализации высокопроизводительных компьютерных средств.

Объем экспериментальной выборки для проверки алгоритмов распознавания на изображениях ортогональных проекций трехмерных объектов составил 96 000 (шесть проекций восьми объектов генерировались по 2000 раз).

Результаты эксперимента были обработаны методами математической статистики с доверительными интервалами, вычисленными по алгоритму, представленному в работе [6].

Данное исследование было направлено на определение способности признаков однозначно идентифицировать по форме различные классы объектов.

Фрагмент таблицы со значениями диагональных признаков невыпуклых изображений проекций "главный вид" тестовых трехмерных объектов приведен в таблице.

В таблице КДО1, КДО2, КДО3, КДО4, КД1, КД2 — соответственно четыре коэффициента диагональных отрезков для невыпуклых изображений и два коэффициента диагоналей.

Проведенные исследования показали, что отклонения значений разработанных признаков формы от среднего по группам изображений в каждой выборке составляют 1 %, что позволяет распознавать проекции трехмерных объектов.

Экспериментальные значения диагональных признаков формы и их отклонений для проекции "главный вид" тестовых трехмерных объектов

| № | Значение | Диагональные признаки формы | | | | | |
|---|--------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | КДО1 | КДО2 | КДО3 | КДО4 | КД1 | КД2 |
| 1 | Минимальное | 0,6842 | 0,6826 | 0,6826 | 0,697 | 0,9555 | 0,9631 |
| | Максимальное | 0,7077 | 0,7144 | 0,7144 | 0,7222 | 0,9973 | 0,9973 |
| | Отклонение | 0,0235 | 0,0317 | 0,0317 | 0,0253 | 0,0419 | 0,0342 |
| 2 | Минимальное | 0,9697 | 0,9551 | 0,9714 | 0,9706 | 0,9847 | 0,9847 |
| | Максимальное | 0,988 | 1 | 1 | 1 | 0,994 | 1 |
| | Отклонение | 0,0183 | 0,0449 | 0,0286 | 0,0294 | 0,0092 | 0,0152 |
| 3 | Минимальное | 0,9811 | 0,5041 | 0,9811 | 0,5041 | 0,6865 | 0,6865 |
| | Максимальное | 0,988 | 0,5218 | 1 | 0,5236 | 0,6995 | 0,6995 |
| | Отклонение | 0,0068 | 0,0177 | 0,0189 | 0,0195 | 0,013 | 0,013 |
| 4 | Минимальное | 0,9857 | 0,4896 | 0,9857 | 0,4899 | 0,7335 | 0,7335 |
| | Максимальное | 0,988 | 0,5002 | 1 | 0,5094 | 0,7383 | 0,741 |
| | Отклонение | 0,0022 | 0,0106 | 0,0143 | 0,0195 | 0,0048 | 0,0075 |
| 5 | Минимальное | 0,9855 | 0,977 | 0,9855 | 0,977 | 0,9897 | 0,9897 |
| | Максимальное | 0,9872 | 1 | 1 | 1 | 0,9911 | 0,9976 |
| | Отклонение | 0,0017 | 0,023 | 0,0145 | 0,023 | 0,0015 | 0,0079 |
| 6 | Минимальное | 0,9601 | 0,6637 | 0,9601 | 0,6637 | 0,8585 | 0,8585 |
| | Максимальное | 0,9796 | 0,6846 | 1 | 0,7001 | 0,8844 | 0,8844 |
| | Отклонение | 0,0195 | 0,0209 | 0,0399 | 0,0364 | 0,0259 | 0,0259 |
| 7 | Минимальное | 0,6845 | 0,698 | 0,6845 | 0,698 | 0,7797 | 0,7797 |
| | Максимальное | 0,707 | 0,7039 | 0,707 | 0,7039 | 0,7964 | 0,7964 |
| | Отклонение | 0,0225 | 0,0058 | 0,0225 | 0,0058 | 0,0167 | 0,0167 |
| 8 | Минимальное | 0,8555 | 0,9829 | 0,9894 | 0,851 | 0,8583 | 0,9924 |
| | Максимальное | 0,8618 | 0,9844 | 0,9904 | 0,8609 | 0,8664 | 0,9932 |
| | Отклонение | 0,0063 | 0,0014 | 0,001 | 0,01 | 0,0081 | 0,0008 |

Список литературы

1. **Мошкин В. И., Петров А. А., Титов В. С., Якушников Ю. Г.** Техническое зрение роботов, М.: Машиностроение, 1990. 272 с. ISBN 5-217-00467-3.
2. **Садыков С. С., Терехин А. В.** Алгоритм классификации выпуклых фигур с использованием диагональных признаков формы // Вестник КГУ им. Н. А. Некрасова, 2013. № 6. С. 13—17.
3. **Садыков С. С., Терехин А. В.** Классификация геометрических фигур, вписанных в квадрат, по их форме с использованием диагональных признаков // Прикаспийский журнал. Управление и высокие технологии. 2014. № 1. С. 81—91.
4. **Терехин А. В.** Распознавание объектов методом вычисления оценок с использованием диагональных признаков формы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 17—25.
5. **Журавлев Ю. И., Никифоров В. В.** Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок // Кибернетика. 1971. № 3. С. 1—11.
6. **Терехин А. В.** Распознавание трехмерных объектов по изображениям двух проекций // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 43—48.
7. **Садыков С. С., Терехин А. В.** Система автоматического распознавания произвольно расположенных трехмерных объектов // Динамика сложных систем — XXI век. 2015. № 1. С. 3—6.
8. **Terekhin A. V.** The Algorithm for Generating Pairs of Projections of Three-Dimensional Objects on Two Images // *J. Applied Mechanics and Materials*, 2015. Vol. 770. P. 604—607.
9. **Galushkin A. I., Danilin S. N., Shchanikov S. A.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems // *Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. 2015. P. 1—6. (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034).
10. **Danilin S. N., Shchanikov S. A.** Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. 2015. P. 1—5.
11. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Pantelev S. V.** The Algorithm of Operation Accuracy Determining for Memristors-based Artificial Neural Network Synapse // *Proceedings of 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2015*. 2015. P. 724—725.
12. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Pantelev S. V.** The design of educable components of infocommunication systems with specified operation accuracy // *Proceedings of 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2015*. 2015. P. 305—306.

A. V. Terekhin, Ph. D., Assistant Professor, e-mail: terehin_murom@mail.ru

Murom Institute (Branch) of Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs, Murom

The Algorithm for Calculation of the Invariant Features of Non-Convex Image Projections of Randomly Located Three-Dimensional Objects

The quality of finished products in industry is largely dependent on the accuracy of the assembly. When mass production allowed manual assembly of individual production units, with the mass production of its availability in many cases is undesirable and sometimes impossible. The use of systems of automatic recognition (SAR) caused by an increase in requirements for conformity of the goods quality standards and the need to reduce the "human factor". Such systems can be used in industrial production, as well as in laboratory and scientific papers. Objects features are an integral part of any system of automatic recognition. Such systems are used in industry, in the processes associated with the use of conveyor lines (automatic assembly, painting, welding, installation of surface-mounted components, and others). In the case of an arbitrary arrangement of objects in the scene, an important property is the invariance of the selected features to the displacement, rotation and zoom. This research is aimed at developing algorithms for calculating the invariant features of non-convex projections of three-dimensional objects. The article presents the basic definitions, algorithm for calculating form features, the results of research developed features on the test images of flat geometric figures and projections of real three-dimensional objects.

Keywords: automatic recognition system, three-dimensional object, identification, flat nonconvex image, diagonal form features, pattern recognition, image analysis, diagonal segment, object shape, invariant coefficients

References

1. **Moshkin V. I., Petrov A. A., Titov V. S., Jakushnikov Ju. G.** *Tekhnicheskoe zrenie robotov*, Moscow, Mashinostroenie, 1990, 272 p. (in Russian).
2. **Sadykov S. S., Terekhin A. V.** Algoritm klassifikacii vypuklykh figur s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov formy [Classification Algorithm of convex figures with diagonal form features], *Vestnik KGU im. N. A. Nekrasova*, 2013, no. 6, pp. 13—17 (in Russian).
3. **Sadykov S. S., Terekhin A. V.** Klassifikacija geometricheskikh figur, vpisannykh v kvadrat, po ih forme s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov [Classification of geometric shapes, inscribed in the square, according to their shape using diagonal form features], *Prikaspijskij zhurnal. Upravlenie i vysokie tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 81—91 (in Russian).
4. **Terekhin A. V.** Raspoznavanie trekhmernykh ob'ektov po izobrazhenijam dvuh proekcij [Recognition of three-dimensional objects by the images of the two projections], *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 43—48 (in Russian).
5. **Zhuravlev Yu. I., Nikiforov V. V.** Algoritmy raspoznavaniya, osnovannye na vychislenii ocenok, *Kibernetika*, 1971, no. 3, pp. 1—11 (in Russian).
6. **Terekhin A. V.** Raspoznavanie ob'ektov metodom vychisleniya ocenok s ispol'zovaniem diagonal'nykh priznakov formy [Object recognition by computing estimates using a diagonal form features], *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 1, pp. 17—25 (in Russian).
7. **Sadykov S. S., Terekhin A. V.** Sistema avtomaticheskogo raspoznavaniya proizvol'no raspolozhennykh trekhmernykh ob'ektov [Automatic recognition system of randomly located three-dimensional objects], *Dinamika slozhnykh sistem — XXI vek*, 2015, no. 1, pp. 3—6 (in Russian).
8. **Terekhin A. V.** The Algorithm for Generating Pairs of Projections of Three-Dimensional Objects on Two Images, *J. Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 604—607.
9. **Galushkin A. I., Danilin S. N., Shchanikov S. A.** The research of memristor-based neural network components operation accuracy in control and communication systems, *Proceedings of 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. 2015, pp. 1—6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147034.
10. **Danilin S. N., Shchanikov S. A.** Neural Network Control Over Operation Accuracy of Memristor-based Hardware, *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. 2015, pp. 1—5.
11. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Pantelev S. V.** The Algorithm of Operation Accuracy Determining for Memristors-based Artificial Neural Network Synapse, *Proceedings of 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2015*. 2015, pp. 724—725.
12. **Danilin S. N., Shchanikov S. A., Pantelev S. V.** The design of educable components of infocommunication systems with specified operation accuracy, *Proceedings of 25th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2015*, 2015, pp. 305—306.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ GEOINFORMATION SYSTEMS

УДК 004.9

Т. И. Михеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: mikheevati@its-spc.ru,

А. А. Федосеев, диссертант, e-mail: fedoseevale@gmail.com,

С. В. Михеев, канд. техн. наук, доц., e-mail: mikheevati@its-spc.ru,

О. К. Головнин, канд. техн. наук, e-mail: golovnin@bk.ru,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

Метод синтеза тематического слоя объектов транспортной сети на основе материалов космической съемки

Рассматривается вопрос построения тематического слоя объектов транспортной сети на базе космических снимков в условиях ограниченного состава спектральных признаков. В основе предлагаемого решения лежит гибридный подход, предполагающий совместное использование кластерного и контурного подходов к обработке данных дистанционного зондирования Земли для достижения синергетического эффекта в результате объединения спектральных свойств мультиспектрального изображения с пространственной информацией панхроматического изображения.

Ключевые слова: тематический слой, транспортная сеть, динамические объекты, космический снимок, яркость пикселя, СКО значений яркости пикселей, имманентные свойства, пространство признаков

Введение

Модернизация транспортной инфраструктуры является неотъемлемой частью экономического развития современного государства. Рост числа и протяженности автомобильных дорог относится к ряду приоритетных мероприятий по модернизации федеральных и региональных транспортных систем. При этом все более актуальной становится задача оперативного выявления и учета изменений транспортной сети (ТрС) [1, 2], а также определения загруженности магистралей автотранспортом [3]. Значительная площадь территории и большое число субъектов Российской Федерации диктуют необходимость разработки и внедрения подходов к решению указанных задач на основе использования материалов космической съемки высокого разрешения, предполагающих построение соответствующих тематических слоев в специализированной транспортной геоинформационной системе с изображением объектов интереса — элементов ТрС и автотранспорта [2, 4]. Задача распознавания линейно-протяженных объектов на космических снимках не является новой [5—7], некоторые технологические процессы ее решения уже реализованы в коммерческих программных комплексах обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Однако вопрос распознавания элементов ТрС на космических снимках для последующего построения соответствующего тематического слоя в настоящее время не проработан в достаточной степени с точ-

ки зрения учета характерных признаков целевых объектов. В основе существующих доступных систем автоматизированной обработки данных ДЗЗ лежат, как правило, только методы выделения контуров изображения, кластерные методы, используемые для сегментации снимков на однородные тематические области (например, метод *k*-средних, *Isodata*, метод главных компонент и др.), которые характеризуются относительно невысокой точностью при решении рассматриваемой задачи. Кроме того, процесс экстрагирования элементов ТрС слабо автоматизирован и требует комплексного подхода с использованием дополнительных этапов объектно-ориентированного анализа помимо применения указанных методов.

В основе решения задачи синтеза тематического слоя ТрС на базе космического снимка лежит реализация процесса экстрагирования локальных областей изображения, соответствующих объектам класса "*Дорога*", на этом снимке в условиях ограниченного пространства спектральных признаков (наиболее доступные комплекты космических снимков высокого разрешения состоят, как правило, из четырех спектральных каналов). В таких условиях резонно сосредоточиться на концепции объектно-ориентированного анализа изображений с использованием априорных знаний имманентных свойств распознаваемых элементов ТрС [8]. Основой предлагаемого решения является гибридный подход, предполагающий совместное использование кластерного и контурного подходов к обработ-

ке данных ДЗЗ для достижения синергетического эффекта в результате объединения спектральных свойств мультиспектрального изображения с пространственной информацией панхроматического изображения. Таким образом, в отличие от задачи определения характеристик объектов транспортной инфраструктуры (ТрИ) на основе использования гиперспектральных снимков, где достаточно иметь только набор спектральных признаков, для экстрагирования элементов ТрС с использованием комплекта первого типа требуется также анализ пространственных признаков (пространственно-спектральный подход) [9, 10]. Это объясняется тем, что в условиях ограниченного состава спектральных признаков спектральный образ элементов ТрС является весьма схожим со спектральным образом ряда других объектов искусственного происхождения, присутствующих в рассматриваемой сцене [11].

1. Синтез тематического слоя транспортной сети

Метод синтеза тематического слоя ТрС на основе гибридного подхода (рис. 1) представлен последовательностью шагов.

На вход подается космический снимок в виде комплекта, состоящего из панхроматического и спектрального изображений. На выходе формируется упрощенная модель ТрС заданного района,



Рис. 1. Метод синтеза тематического слоя элементов ТрС на основе гибридного подхода

отображаемая в виде осевых линий и используемая впоследствии для поиска изменений конфигурации ТрС. Результаты работы метода, полученные на срезе синтеза результирующего тематического слоя элементов ТрС, могут быть также использованы в других приложениях.

Шаг 1. Комплексование исходного комплекта изображений. В результате операции комплексования исходного комплекта изображений формируется спектрально-пространственное изображение с числом и границами спектральных каналов, соответствующих числу и границам каналов спектрально-пространственного изображения исходного комплекта, и пространственным разрешением, соответствующим пространственному разрешению панхроматического изображения исходного комплекта, подающегося на вход системы. В качестве метода комплексования используется подход, описанный в работе [12] и реализованный в ряде коммерческих программных пакетов обработки информации ДЗЗ.

Шаг 2. Формирование глобальных целевых сегментов. На данном этапе проводится предварительное выделение глобальных сегментов на основе спектральных каналов исходного снимка I , в состав которых входят области \tilde{d}_j^R , с использованием только спектрально-яркостных характеристик изображения в условиях априорного отсутствия соответствующих эталонов.

В целях предварительного исключения из процесса анализа областей изображения, соответствующих объектам типа "Трава" и "Дерево", для изображения, полученного на предыдущем этапе, проводится расчет вегетационного индекса $NDVI$:

$$NDVI = \frac{\rho^{NIR} - \rho^{RED}}{\rho^{NIR} + \rho^{RED}},$$

где ρ^{NIR} — значение отражательной способности в ближнем инфракрасном диапазоне спектра; ρ^{RED} — значение отражательной способности в красном диапазоне спектра.

Области изображения со значениями $NDVI > 0$ исключаются и не учитываются при последующем анализе.

Снимок может быть представлен как множество спектральных признаков объектов, присутствующих на этом снимке:

$$\tilde{P}_T^S = \{\tilde{P}_{t_1}^S, \tilde{P}_{t_2}^S, \dots, \tilde{P}_{t_i}^R, \dots, \tilde{P}_{t_n}^S\},$$

где $t_i \in T$ — объекты, присутствующие на снимке; n — число этих объектов; \tilde{t}_i^R — объект ТрИ, подлежащий экстрагированию.

Требуется построить множество кластеров \tilde{B} и отображение множества \tilde{P}_T^S на множество \tilde{B} , т.е.

$\tilde{Y}: \tilde{P}_T^s \rightarrow \tilde{B}$. Отображение \tilde{Y} задает модель данных, являющуюся решением задачи данного этапа. Это отображение является однозначным, так как всякому элементу из множества \tilde{P}_T^s ставится в соответствие только один элемент из множества \tilde{B} . Кроме того, в каждый элемент из множества \tilde{B} отображается хотя бы один элемент из множества \tilde{P}_T^s , что определяет сюръективность отображения \tilde{Y} . Множество \tilde{B} можно представить следующим образом:

$$\tilde{B} = \{\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_h, \dots, \tilde{b}_z\},$$

где \tilde{b}_h — кластер, содержащий походящие друг на друга признаки объектов из множества \tilde{P}_T^s . Каждый из объектов t_i , представленных на анализируемом снимке, может быть описан следующим образом:

$$\tilde{P}_{t_i}^s = \{\tilde{p}_{t_i,1}^s, \dots, \tilde{p}_{t_i,m}^s\},$$

где m — число спектральных признаков объекта.

Кластер \tilde{b}_h , включающий в себя целевую область $\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^R}$, определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \tilde{b}_h = \{ & \tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,q}^s, \tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,u}^s | \tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,q}^s \in \tilde{P}_{\tilde{t}_i^R}^s \subset \tilde{P}_T^s, \tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,u}^s \in \\ & \tilde{P}_{\tilde{t}_i^R}^s \subset \tilde{P}_T^s \wedge d(\tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,q}^s, \tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,u}^s) < \varepsilon\}, \end{aligned}$$

где ε — величина, определяющая меру близости между признаками (расстояние).

Таким образом, если расстояние между двумя признаками $\tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,1}^s$ и $\tilde{p}_{\tilde{t}_i^R,2}^s$ объекта ТрИ \tilde{t}_i , представленного на снимке, меньше некоторого значения ε , то эти признаки принадлежат одному кластеру.

В результате на данном этапе формируются сегменты изображения, включающие в свой состав

совокупность областей $\tilde{D}^{\tilde{T}^R} = \{\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^R}\}$, соответствующих элементам ТрС, а также совокупность областей

$\tilde{D}^{\tilde{L}} = \{\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^L}\}$, не соответствующих элементам ТрС.

Предварительный тематический слой, формирующийся на данном этапе, обозначим \tilde{S}_1^N .

В контексте рассматриваемой задачи, учитывая разнородность сюжетов анализируемых изображений и принимая во внимание различие яркостных характеристик в пределах этих изображений, использование подходов на основе классификации без учителя (кластеризации) более предпочтительно по сравнению с подходами на основе классификации с учителем. Практика обработки данных ДЗЗ

показывает, что это обусловлено отсутствием достаточного числа эталонов, используемых для обучения в процессе классификации в условиях ограниченного состава спектральных признаков. Как следствие, в случае использования методов классификации с учителем результаты обработки содержат множество ошибок первого и второго рода. В качестве метода кластеризации используют метод k -средних [13, 14]. Задается исходное число кластеров, на которые разбивают пиксели изображения. В ходе пост-классификационной обработки на основе полученного набора кластеров формируют обобщенные классы объектов, соответствующие элементам ТрС.

Шаг 3. Формирование целевых сегментов на основе обнаружения площадных объектов. На вход на данном этапе подается панхроматическое изображение, включающее в себя только глобальные целевые сегменты, полученные в результате классификации спектрально-анализированного изображения.

При распознавании объектов ТрС следует учитывать специфику состава объектов, присутствующих на снимках урбанизированных и загородных территорий. Учитывая ограниченный состав спектральных признаков целевых объектов, а также схожие спектральные характеристики объектов ТрС и других объектов рассматриваемой сцены, результаты обработки снимков урбанизированных территорий могут отличаться от результатов обработки снимков загородных сюжетов. Размеры объектов, не соответствующих элементам ТрС, на снимках урбанизированных территорий могут превышать размеры самих элементов ТрС. В этом случае подходы к сегментации целевых объектов на основе использования информации только об их форме и размерах могут быть малоэффективными. Для решения данной проблемы предлагается подход на основе модернизированного метода, описанного в работе [15]. Целью применения подхода является выделение на снимке урбанизированных территорий областей, соответствующих площадным объектам типа объектов класса "Искусственное сооружение", для которых выполняются следующие условия:

> равномерное распределение функции яркости в

пределах соответствующей области $\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^B}$, которое означает, что значение среднего квадратического отклонения (СКО) яркости пикселей каждого канала пространственно-спектрального куба, принадлежащих данной области, стремится к нулю:

$$\sigma[f(x, y)] \rightarrow 0, (x, y) \in \tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^B}; \quad (1)$$

> ширина области $\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^B}$ намного больше ширины области $\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^R}$:

$$\tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^B} \gg \tilde{d}_j^{\tilde{t}_i^R}. \quad (2)$$

Данный этап является необходимым при обработке изображений урбанизированных сюжетов. При обработке изображений загородных сюжетов, характеризующихся отсутствием большого числа инфраструктурных объектов, данный этап может быть исключен из цепочки обработки.

Определим некоторую квадратную область $\tilde{d}^{\tilde{p}}$ с центром в \tilde{p} , заданную длиной стороны $\tilde{a}^{\tilde{p}}$ (рис. 2):

$$\tilde{d}^{\tilde{p}} = \tilde{d}(\tilde{a}^{\tilde{p}}, \tilde{p}). \quad (3)$$

Построим четыре линии с центрами в \tilde{p} в горизонтальном, вертикальном и двух диагональных направлениях. Ограничим линии областью $\tilde{d}^{\tilde{p}}$. Обозначим \tilde{l}_1 линию, построенную в горизонтальном направлении, \tilde{l}_2 линию, построенную в вертикальном направлении, \tilde{l}_3 линию, построенную в диагональном направлении из нижнего правого угла в верхний левый угол, \tilde{l}_4 линию, построенную в диагональном направлении из верхнего левого угла в нижний правый угол. Обозначим: $\tilde{d}^{\tilde{l}_1}$ — группа пикселей, образованная пересечением этих пикселей линией \tilde{l}_1 и входящая в состав области $\tilde{d}^{\tilde{p}}$; $\tilde{d}^{\tilde{l}_2}$ — группа пикселей, образованная пересечением этих пикселей линией \tilde{l}_2 и входящая в состав области $\tilde{d}^{\tilde{p}}$; $\tilde{d}^{\tilde{l}_3}$ — группа пикселей, образованная пересечением этих пикселей линией \tilde{l}_3 и входящая в состав области $\tilde{d}^{\tilde{p}}$; $\tilde{d}^{\tilde{l}_4}$ — группа пикселей, образованная пересечением этих пикселей линией \tilde{l}_4 и входящая в состав области $\tilde{d}^{\tilde{p}}$.

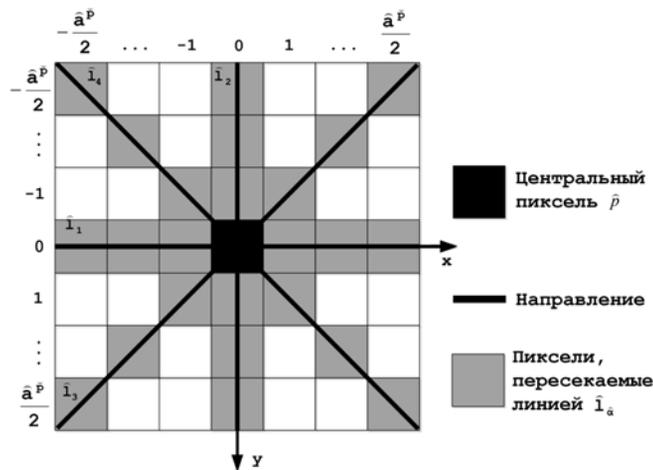


Рис. 2. Иллюстрация области, используемой для распознавания площадных объектов

Каждая указанная группа пикселей характеризуется математическим ожиданием M , дисперсией D и СКО σ значений яркости этих пикселей:

> горизонтальное направление:

$$M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_1}} = \frac{\sum_{i,j} f(i,j)}{2n}, \quad i = 0, -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (4)$$

$$D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_1}} = \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_1}}]^2}{2n}, \quad i = 0, -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (5)$$

$$\sigma^{\tilde{d}^{\tilde{l}_1}} = \sqrt{D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_1}}}; \quad (6)$$

> вертикальное направление:

$$M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_2}} = \frac{\sum_{i,j} f(i,j)}{2n}, \quad \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad j = 0; \quad (7)$$

$$D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_2}} = \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_2}}]^2}{2n}, \quad \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad j = 0; \quad (8)$$

$$\sigma^{\tilde{d}^{\tilde{l}_2}} = \sqrt{D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_2}}}; \quad (9)$$

> диагональное направление из нижнего правого угла в верхний левый угол:

$$M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_3}} = \frac{\sum_{i,j} f(i,j)}{2n}, \quad \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (10)$$

$$D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_3}} = \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_3}}]^2}{2n}, \quad \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (11)$$

$$\sigma^{\tilde{d}^{\tilde{l}_3}} = \sqrt{D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_3}}}; \quad (12)$$

> диагональное направление из нижнего левого угла в верхний правый угол:

$$M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_4}} = \frac{\sum_{i,j} f(i,j)}{2n}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (13)$$

$$D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_4}} = \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - M^{\tilde{d}^{\tilde{l}_4}}]^2}{2n}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq i \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}, \quad -\frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2} \leq j \leq \frac{\tilde{a}^{\tilde{p}}}{2}; \quad (14)$$

$$\sigma^{\tilde{d}^{\tilde{l}_4}} = \sqrt{D^{\tilde{d}^{\tilde{l}_4}}}. \quad (15)$$

В выражениях (4)–(15) $f(i, j)$ — значение яркости пикселя, расположенного в i -й строке и j -м столбце области $\hat{d}^{\bar{p}}$; n — число пикселей, составляющих каждую из четырех областей $\hat{d}^{\hat{l}_1}$, $\hat{d}^{\hat{l}_2}$, $\hat{d}^{\hat{l}_3}$, $\hat{d}^{\hat{l}_4}$.

Для каждой из четырех областей $\hat{d}^{\hat{l}_1}$, $\hat{d}^{\hat{l}_2}$, $\hat{d}^{\hat{l}_3}$, $\hat{d}^{\hat{l}_4}$ в соответствии с (6), (9), (12) и (15) находим значения СКО яркости входящих в эти области пикселей.

Для эффективного отделения объектов, соответствующих классу "Искусственное сооружение", от объектов, соответствующих классу "Дорога", размер рабочего окна, соответствующего области $\hat{d}^{\bar{p}}$, должен превосходить ширину областей, соответствующих объектам класса "Дорога". Задается пороговое значение $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$ СКО значений яркости пикселей,

входящих в области $\hat{d}^{\hat{l}_1}$, $\hat{d}^{\hat{l}_2}$, $\hat{d}^{\hat{l}_3}$, $\hat{d}^{\hat{l}_4}$. Если значения СКО по четырем направлениям меньше $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$,

будем считать объект в границах области $\hat{d}^{\bar{p}}$ однородным. Следовательно, такой объект не принадлежит к классу "Дорога" и должен быть исключен. В случае превышения значения СКО хотя бы по одному направлению порогового значения $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$ объект в границах области имеет возможную принадлежность к классу "Дорога". Такой сегмент изображения подлежит дальнейшему анализу. Для области $\hat{d}^{\bar{p}}$ проверка условий ее принадлежности области $\hat{d}^{\hat{l}_i^B}$ выглядит следующим образом:

$$f(\tilde{I}, \hat{d}^{\bar{p}}) = [(\sigma^{\hat{d}^{\hat{l}_1}} < \hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}) \wedge (\sigma^{\hat{d}^{\hat{l}_2}} < \hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}) \wedge (\sigma^{\hat{d}^{\hat{l}_3}} < \hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}) \wedge (\sigma^{\hat{d}^{\hat{l}_4}} < \hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}})]. \quad (16)$$

Обозначим \tilde{S}_2^N тематический слой, формируемый на данном этапе в результате исключения областей $\hat{d}^{\hat{l}_i^B}$.

Алгоритм формирования целевых сегментов на основе обнаружения площадных объектов, не соответствующих элементам ТрС, показан на рис. 3.

Определяется квадратная область $\hat{d}^{\bar{p}}$ (3) с центром в точке \tilde{p} . Область характеризуется длиной стороны $\hat{a}^{\bar{p}}$, задаваемой оператором с учетом условия (2). Данная область проверяется на принадлежность области, обладающей свойствами объекта класса "Искусственное сооружение" (1), (2). Выпол-

няется перемещение области $\hat{d}^{\bar{p}}$ по изображению в режиме "скользящего окна" с шагом, соответствующим длине стороны $\hat{a}^{\bar{p}}$. Принадлежность $\hat{d}^{\bar{p}}$ области, соответствующей объекту класса "Искусственное сооружение", определяется в соответствии с (16). Задается пороговое значение $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$ СКО значений яркости пикселей, входящих в области $\hat{d}^{\hat{l}_1}$, $\hat{d}^{\hat{l}_2}$, $\hat{d}^{\hat{l}_3}$, $\hat{d}^{\hat{l}_4}$. Если значения СКО по четырем направлениям меньше $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$, объект в границах об-

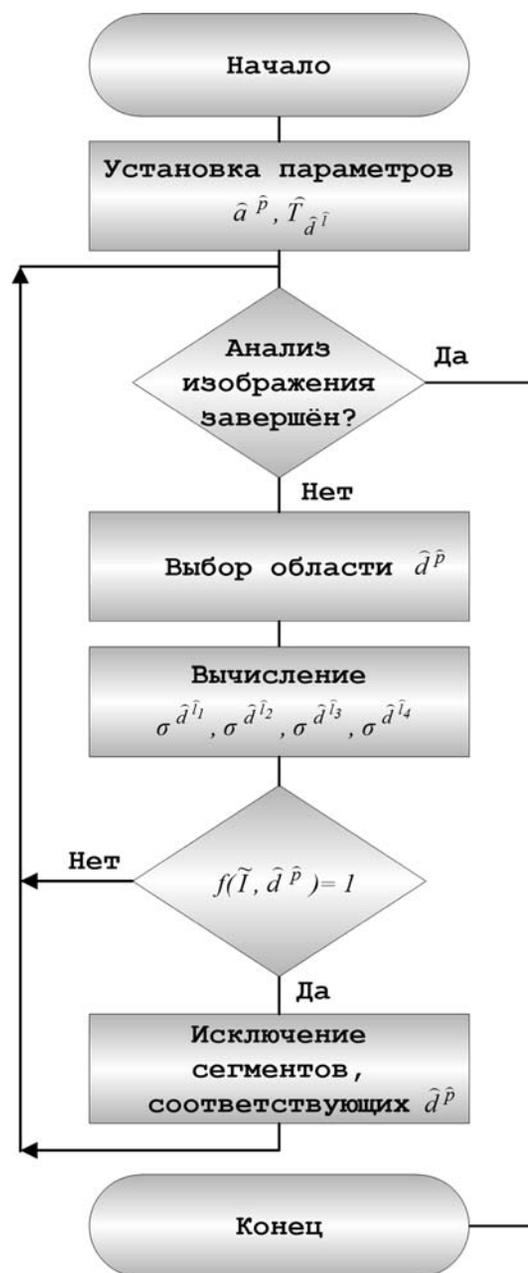


Рис. 3. Алгоритм формирования сегментов на основе выделения площадных объектов

ласти $\hat{d}^{\bar{p}}$ считается однородным. Следовательно, такой объект не принадлежит к классу "Дорога" и должен быть исключен. В случае превышения значения СКО хотя бы по одному направлению порогового значения $\hat{T}_{\hat{d}^{\bar{p}}}$ объект в границах области имеет возможную принадлежность к классу "Дорога". Такой сегмент изображения подлежит анализу на следующих этапах.

Шаг 4. Выделение контуров объектов на панхроматическом изображении. На вход на данном этапе подается исходное панхроматическое изображение. В качестве инструмента выделения контуров объектов на изображении используется детектор границ Кэнни, представляющий собой многоступенчатый алгоритм, состоящий из следующих шагов [16]:

- > сглаживание;
- > поиск градиентов;
- > подавление немаксимумов;
- > двойная пороговая фильтрация;
- > трассировка области неоднозначности.

Метод Кэнни ориентирован на три основных критерия:

- > хорошее обнаружение границы (путем повышения отношения сигнал/шум);
- > хорошая локализация (точное определение положения границы);
- > единственный отклик на одну границу.

Указанные критерии лежат в основе целевой функции стоимости ошибок, минимизация которой обеспечивает поиск оптимального линейного оператора для свертки с изображением.

Сглаживание на основе использования первой производной Гауссиана обеспечивает уменьшение чувствительности алгоритма к шуму. Маска Гауссиана выглядит следующим образом:

$$\hat{I} = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \cdot I,$$

где \hat{I} — изображение, полученное после применения маски Гауссиана; I — исходное изображение.

Далее проводится вычисление градиента изображения \hat{I} :

$$\begin{aligned} \nabla f(x, y) &= \sqrt{G_x^2 + G_y^2}; \\ \theta(x, y) &= \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\theta(x, y)$ — угол, определяющий направление вектора градиента.

Полученные согласно (17) значения угла направления вектора градиента округляются до одного из четырех значений: 0, 45, 90, 135°. Информация о направлении границы используется в целях удаления точки именно рядом с границей и исключения разрыва границы вблизи локальных максимумов градиента.

Двойная пороговая фильтрация обеспечивает удаление слабых границ. В случае превышения значения градиента в пределах рассматриваемого фрагмента верхнего порога этот фрагмент считается допустимой границей в тех местах, где значение градиента падает ниже этого порога до тех пор, пока значение не станет ниже нижнего порога. В случае отсутствия на всем фрагменте точек со значением, превышающим верхний порог, этот фрагмент удаляется. Такой гистерезис обеспечивает уменьшение числа разрывов в границах.

Результирующие границы определяются на основе подавления краев, не связанных с определенными (сильными) границами.

Обозначим \tilde{S}_3^N предварительный тематический слой, формирующийся на этапе выделения контуров на панхроматическом изображении.

Шаг 5. Синтез результирующего тематического слоя элементов ТрС. Процесс синтеза результирующего тематического слоя элементов ТрС состоит из двух основных шагов:

- > комплексирование результатов, полученных в ходе реализации рассмотренных выше этапов обработки исходного комплекта изображений;
- > окончательная сегментация по критерию формы и размеров областей, полученных на предыдущем шаге.

На вход этапа подаются исходные данные в виде следующих предварительных тематических слоев:

- > слой сегментов, образованных в результате обнаружения и исключения площадных объектов, не соответствующих элементам ТрС;
- > слой контуров объектов, представленных на исходном панхроматическом изображении.

Отображаемые на тематическом слое \tilde{S}_2^N области

$\hat{d}_j^{\tilde{I}_i}$, соответствующие объектам \tilde{l}_i , которые не являются элементами ТрС, могут как иметь связи с

областями $\hat{d}_j^{\tilde{I}_i^R}$, соответствующими элементам ТрС, так и не иметь таких связей. В случае отсутствия

связей с областями $\hat{d}_j^{\tilde{I}_i^R}$ области $\hat{d}_j^{\tilde{I}_i}$ могут быть исключены на основе информации об их размерах и

форме. Исключение областей $\hat{d}_j^{\tilde{I}_i}$, связанных с об-

ластями $\hat{d}_j^{\tilde{I}_i^R}$, без разрушения элементов ТрС представляет собой более сложную задачу. Для ее ре-

шения целесообразно использовать информацию о контурах объектов, представленных тематическим слоем \tilde{S}_3^N . Далее исключаются отделенные в результате данной операции области на основе информации об их размерах и форме.

Обозначим $\tilde{C} = \{\tilde{c}_i\}$ контуры объектов изображения, отображаемые на тематическом слое \tilde{S}_3^N . Множество объектов за пределами контуров обозначим $\tilde{H} = \{\tilde{h}_i\}$. Совокупность областей, соответствующих контурам \tilde{c}_i , представим как $\tilde{D}^{\tilde{c}_i} = \{\tilde{d}_j^{\tilde{c}_i}\}$, совокупность областей, соответствующих объектам за пределами контуров \tilde{h}_i , — $\tilde{D}^{\tilde{h}_i} = \{\tilde{d}_j^{\tilde{h}_i}\}$.

Пусть $\tilde{S}_{4(-)}^N$ — предварительный тематический слой, синтезируемый в ходе совместного использования результатов построения целевых сегментов на основе выделения площадных объектов, не соответствующих элементам ТрС, результатов выделения контуров объектов на исходном изображении, а также результатов выделения точек на панхроматическом изображении, соответствующих элементам ТрС.

Процесс построения тематического слоя $\tilde{S}_{4(-)}^N$ сегментации целевых областей, соответствующих элементам ТрС, может быть описан следующим выражением:

$$\tilde{S}_{4(-)}^N = \begin{cases} \tilde{D}^{\tilde{c}_i} & \text{if only } \{(\tilde{D}^{\tilde{c}_i} \in \tilde{S}_2^N) \wedge (\tilde{D}^{\tilde{h}_i} \in \tilde{S}_3^N)\} \\ \tilde{D}^{\tilde{h}_i} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

На данном этапе метод синтеза тематического слоя элементов ТрС может быть представлен как процесс построения тематического слоя $\tilde{S}_{4(-)}^N$ на основе предварительного тематического слоя $\tilde{S}_{4(-)}^N$:

$$M_{\tilde{S}_{4(-)}^N} = F_{\tilde{S}_{4(-)}^N}(\tilde{S}_{4(-)}^N, \tilde{S}_{4(-)}^N).$$

Дальнейшая обработка, направленная на получение заданного тематического слоя элементов ТрС, связана с сегментацией полученных ранее областей в соответствии с их размерами и формой. Устанавливается пороговое значение числа пикселей, образующих область, превышение которого обеспечивает принадлежность объектов этой области к классу "Дорога":

$$\hat{d}_j = \hat{d}_j^{\tilde{c}_i} \text{ if } \{(\hat{a}_j > \hat{T}_p) \wedge (\hat{b}_j < \hat{T}_p)\},$$

где \hat{d}_j — рассматриваемая область; \hat{a}_j — длина рассматриваемой области; \hat{b}_j — ширина рассматриваемой области; \hat{T}_p — пороговое значение числа пикселей в рассматриваемой области.

Для сегментации незначительных областей, размеры которых соответствуют как объектам класса "Дорога", так и другим объектам (например, класса объектов "Искусственное_сооружение"), целесообразно использование критерия компактности, являющегося одним из способов оценки формы:

$$\hat{C} = \frac{\hat{P}^2}{4\pi \sum_{j=1}^n (\hat{a}_j \hat{b}_j)},$$

где \hat{C} — компактность; \hat{P} — длина внешней границы целевого объекта, представленного в виде совокупности областей \hat{d}_j ; $\sum_{j=1}^n (\hat{a}_j \hat{b}_j)$ — общая площадь областей, образующих целевой объект; n — число областей, образующих целевой объект.

Условие, определяющее сегментацию элементов ТрС малой длины:

$$\hat{d}_j = \hat{d}_j^{\tilde{c}_i} \text{ if } \{(\hat{C}^{\hat{d}_j} > \hat{T}^{\hat{C}^{\hat{d}_j}})\},$$

где $\hat{C}^{\hat{d}_j}$ — значение компактности для объекта \hat{d}_j ; $\hat{T}^{\hat{C}^{\hat{d}_j}}$ — пороговое значение компактности.

Шаг 6. Скелетизация. На вход данного этапа подается изображение, полученное в результате выделения сегментов ТрС. Целью этапа является выделение осевых линий элементов ТрС — дорог.

Скелетизация представляет собой процесс построения скелета, описывающего форму ТрС.

Для реализации данного этапа применяют алгоритм Зонга—Суны [17]. Используется фильтр размером 3×3 , который перемещается по изображению с проверкой принадлежности каждого пикселя к границе сегмента ТрС. Если условия проверки выполняются, то пиксель удаляется из области. Независимо от числа выполненных шагов сегмент остается связным, в предельном случае он выродится в линию толщиной в один пиксель.

2. Синтез слоя динамических объектов

В основе метода синтеза тематического слоя динамических объектов транспортной инфраструктуры, т.е. определения оценки загруженности ТрС, лежит решение задачи сегментации на снимке объектов класса "Транспортное_средство". Требуется реализовать автоматизированную процедуру выделения контуров областей $\hat{d}_j^{\tilde{c}_i}$, лежащих в границах

областей $\hat{d}_j^{\tilde{c}_i}$, на основе оценки изменений значений функции яркости в границах областей панхроматического изображения (или в одном из каналов

комплексированного изображения) I , соответствующих областям, сформированным в результате построения тематического слоя \tilde{S}^N . Для решения данной задачи предлагается применение подхода на основе использования дифференциального оператора второго порядка — оператора Лапласа (Лапласиана):

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}.$$

В дискретном случае оператор Лапласа реализуется в виде процедуры линейной обработки изображения окном 3×3 . Вторые производные аппроксимируются вторыми разностями:

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} \approx f(m_i + 1, n_j) - 2f(m_i, n_j) + f(m_i - 1, n_j),$$

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \approx f(m_i, n_j + 1) - 2f(m_i, n_j) + f(m_i, n_j - 1).$$

Фильтр с конечно-импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) для оператора Лапласа:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Так как лапласиан принимает как положительные, так и отрицательные значения, в операторе следует использовать его абсолютное значение. В результате получаем подход к выделению границ области \tilde{d}_i^y , нечувствительный к ее ориентации:

$$z(m_i, n_j) = |f(m_i + 1, n_j) + f(m_i - 1, n_j) + f(m_i, n_j + 1) + f(m_i, n_j - 1) - 4f(m_i, n_j)|.$$

В качестве исходных данных для работы метода используется маска ТрС, полученная описанным выше методом, и оперативный снимок заданной территории. Для дальнейшего анализа используется оперативная маска-снимок с фиксированной дорожной ситуацией на момент проведения съемки. Для выделения автотранспорта применяется сверточный фильтр на основе лапласиана гауссиана с размером ядра свертки 5×5 . Схема решения задачи сегментации представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема сегментации автотранспорта на космическом снимке

Заключение

Рассмотренные в работе подходы обеспечивают экстрагирование элементов ТрС и динамических объектов ТрИ на космических снимках высокого разрешения в условиях ограниченного пространства спектральных признаков.

Синтез тематических слоев выполняется с использованием гибридного подхода, предполагающего совместное применение кластерного и контурного подходов к обработке данных ДЗЗ.

В качестве исходных данных для работы описанных методов могут быть использованы материалы космической съемки, получаемые отечественными средствами дистанционного зондирования Земли типа "Ресурс-П" и "Аист-2Д".

Представленные модели и методы могут быть встроены в контур наземной тематической обработки и цепочку создания базовых стандартных продуктов на основе информации дистанционного зондирования для создания специализированных тематических слоев, используемых при решении практических задач в сегменте "Транспортная инфраструктура".

Список литературы

1. Zhang Q., Couloigner I. Automatic road change detection and GIS updating from high spatial remotely-sensed imagery. URL: http://www.dupad.hku.hk/cusup/asiagis/Full_Paper/Zhang_Qiaoping.pdf.
2. Михеева Т. И., Федосеев А. А. Автоматизированная идентификация изменений конфигурации дорожной сети на основе материалов космической съемки // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2016): труды Международной научно-технической конференции / под ред. С. А. Прохорова. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016. С. 123—126.
3. Мясников В. В. Метод обнаружения транспортных средств на цифровых аэрофото- и космических изображениях дистанционного зондирования Земли // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 3. С. 429—438.
4. Михеева Т. И. Построение математических моделей объектов улично-дорожной сети города с использованием геоинформационных технологий // Информационные технологии. 2006. № 1. С. 69—75.
5. Karaman E., Cinar U., Gedik E., Yardimci Y., Halici U. A new algorithm for automatic road network extraction in multispectral satellite images // Proc. of the 4th GEOBIA. May 7—9, 2012. Rio de Janeiro, Brasil. P. 455—459.
6. Kumar M., Singh R. K., Raju P. L. N., Krishnamurthy Y. V. N. Road network extraction from high-resolution multispectral satellite imagery based on object oriented techniques // ISPRS Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2014. Vol. II-8. P. 107—110.
7. Mena J. B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification // Pattern recognition letters. 2003. Vol. 24. P. 3037—3058.
8. Hussain M. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches // ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing. 2013. Vol. 80. P. 81—106.
9. Михеева Т. И., Федосеев А. А. Кластеризация гиперспектральных данных мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Известия Самарского научного центра РАН. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2014. С. 435—442.
10. Аншаков Г. П., Журавель Ю. Н., Федосеев А. А. Эффективность использования мульти-спектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга

окружающей среды // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4 (42). С. 38–48.

11. **Herold M., Gardner M., Noronha V., Robert D.** Spectrometry and hyperspectral remote sensing of urban road infrastructure. URL: http://www.eo.uni-jena.de/~c5hema/pub/rse04_heroldetal.pdf.

12. **Патент US006011875A.** Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening / Laben et al. № 6,011,875; заявлено 29.04.1998; опубл. 04.01.2000. 9 с.

13. **Шовенгердт Р. А.** Дистанционное зондирование: методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

14. **Зимичев Е. А., Казанский Н. Л., Серафимович П. Г.** Пространственная классификация гиперспектральных изображе-

ний с использованием метода кластеризации k-means++ // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 281–286.

15. **Zhang Y.** Texture-Integrated classification of urban treed areas in high-resolution color-infrared imagery // Photogrammetric engineering and remote sensing. 2001. Vol. 67. P. 1359–1365.

16. **Ding L.** On the Canny edge detector. URL: <http://soe.rutgers.edu/~meer/TEACH/ADD/cannyedge.pdf>.

17. **Zhang T., Suen C., Ching Y.** A Fast Parallel Algorithms For Thinning Digital Patterns // Communication of the ACM. 1984. Vol. 27, N. 3. P. 236–239.

T. I. Mikheeva, D. Sc. Professor., e-mail: mikheevati@its-spc.ru,

A. A. Fedoseev, Candidate, e-mail: fedoseevale@gmail.com,

S. V. Mikheev, Ph. D., Assistant professor, e-mail: mikheevati@its-spc.ru,

O. K. Golovnin, Assistant, e-mail: golovnin@bk.ru,

Samara University, Samara, 443086, Russia

Method of Transport Net Thematic Layer Synthesis via Remotely Sensed Imagery

Nowadays modernization of transport infrastructure is an essential part of a government economic development. Growth of road units and their stretch is one of the high-priority activities in a process of federal and regional transport infrastructure modernization. However, the issue of an immediate identification and tracking the variation of road network items, as well as the definition of features and a state of transport infrastructure facilities and a highway transport load becomes up-to-date. In view of the vast area and a big amount of subjects of the Russian Federation, it is necessary to develop and implement ways to solve above issues based on space survey materials. These materials are supposed to develop mapping with corresponding subject layers that can display objects of interest — road network elements and transport items.

Keywords: thematic layer, transport net, dynamic objects, satellite imagery, pixel value, pixel values standard deviation, immanent properties, feature space

References

1. **Zhang Q., Couloigner I.** Automatic road change detection and GIS updating from high spatial remotely-sensed imagery. URL: http://www.dupad.hku.hk/cusup/asiagis/Full_Paper/Zhang_Qiaoping.pdf.

2. **Mikheeva T. I., Fedoseev A. A.** Avtomatizirovannaya identifikatsiya izmeneniy konfiguratsii dorozhnoy seti na osnove materialov kosmicheskoy s'emki (*Automatic identification of transport net changes via Earth remotely sensed data*), *Perspektivnye informatsionnye tehnologii (PIT-2016): trudi Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii pod red. S. A. Prokhorova*, Samara, Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2016, pp. 123–126 (in Russian).

3. **Myasnikov V. V.** Metod obnaruzheniya transportnih sredstv na tsifrovih aerofoto- i kosmicheskikh izobrazheniyah distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Method of transport vehicles detection on digital aerospace remotely sensed images), *Komputernaya optika*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 429–438 (in Russian).

4. **Mikheeva T. I.** Postroenie matematicheskikh modeley ob'ektov ulichno-dorozhnoy seti goroda s ispol'zovaniem geoinformatsionnih tehnologii (*City road network mathematical models creation with geoinformation technologies use*), *Informatsionnye tehnologii*, 2006, no. 19, pp. 69–75 (in Russian).

5. **Karaman E., Cinar U., Gedik E., Yardimci Y., Halici U.** A new algorithm for automatic road network extraction in multispectral satellite images, *Proceedings of the 4th GEOBIA. May 7–9, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 455–459.

6. **Kumar M., Singh R. K., Raju P. L. N., Krishnamurthy Y. V. N.** Road network extraction from high-resolution multispectral satellite imagery based on object oriented techniques, *ISPRS Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2014, vol. II-8, pp. 107–110.

7. **Mena J. B.** State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification, *Pattern recognition letters*, 2003, vol. 24, pp. 3037–3058.

8. **Hussain M.** Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 2013, vol. 80, pp. 81–106.

9. **Mikheeva T. I., Fedoseev A. A.** Clusterizatsiya giperspektral'nih dannih monitoringa ob'ektov transportnoy infrastruktury (*Hyperspectral data of transport infrastructure objects monitoring clusterization*), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. Samara, Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2014, pp. 435–442 (in Russian).

10. **Anshakov G. P., Zhuravel Yu. N., Fedoseev A. A.** Effektivnost' ispol'zovaniya multispektral'nih i giperspektral'nih dannih distantsionnogo zondirovaniya v zadachah monitoringa okruzhayushey sredi (*The effectiveness of multispectral and hyperspectral remotely sensed data usage in environment monitoring tasks solution*), *Vestnik Samarskogo universiteta*, 2013, no. 4 (42), pp. 38–48 (in Russian).

11. **Herold M., Gardner M., Noronha V., Robert D.** Spectrometry and hyperspectral remote sensing of urban road infrastructure. URL: http://www.eo.uni-jena.de/~c5hema/pub/rse04_heroldetal.pdf.

12. **Patent US006011875A.** Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening, Laben et al. no. 6,011,875; declare 29.04.1998; published 04.01.2000. 9 p.

13. **Showengerdt R. A.** *Distantsionnoe zondirovanie: metodi i modeli obrabotki izobrazheniy* (Models and methods for image processing), Moscow, Tekhosfera, 2010, 560 p. (in Russian).

14. **Zimichev E. A., Kazanskiy N. L., Serafimovich P. G.** Prostranstvennaya klassifikatsiya geperspektral'nih izobrazheniy s ispol'zovaniem metoda klasterizatsii k-means + + (*Spectral-spatial classification with k-means + + partitional clustering*), *Computer Optics*, 2014, vol. 38, no. 1, pp. 154–158 (in Russian).

15. **Zhang Y.** Texture-Integrated classification of urban treed areas in high-resolution color-infrared imagery, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2001, vol. 67, pp. 1359–1365.

16. **Ding L.** On the Canny edge detector. URL: <http://soe.rutgers.edu/~meer/TEACH/ADD/cannyedge.pdf>.

17. **Zhang T., Suen C., Ching Y.** A Fast Parallel Algorithms For Thinning Digital Patterns, *Communication of the ACM*, 1984, vol. 27, no. 3, pp. 236–239.

С. Л. Беляков, д-р техн. наук, проф., e-mail: beliacov@yandex.ru,
М. Л. Белякова, канд. техн. наук, доц., e-mail: mlbelyakova@sfedu.ru,
М. Н. Савельева, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: msavelyeva@sfedu.ru
Южный федеральный университет, Таганрог

Интеллектуальное управление диалогом при визуальном анализе сложных карт и схем

Работа посвящена анализу метода контроля процесса визуализации сложных электронных карт, планов и схем, позволяющего повышать смысловое содержание картографических изображений. Вводится функция полезности изображения, связанная с восприятием картографических образов. Описываются интеллектуальные процедуры конструирования пространственной, временной и семантической границ образа, а также упрощения и усложнения анализируемой области. Приводится пример реализации процедуры контроля полезности изображения.

Ключевые слова: визуальный анализ, интеллектуальное управление, картографическая визуализация, геоинформационные системы, визуализация

Введение

Визуализация систем реального мира компьютерными системами представляет большой научный и практический интерес. Во многом это связано с анализом ситуаций и выработкой решений в различных областях производства, управления, учета и планирования. Традиционным средством изучения пространственных объектов является картографическая визуализация, выполняемая геоинформационными системами [1]. Роль визуального анализа в картографическом исследовании чрезвычайно высока. Изучение скомпонованного картографического изображения стимулирует образное мышление аналитика, дает возможность увидеть неожиданные особенности строения объекта, позволяет генерировать нестандартные решения сложных проблем [2]. С помощью схем и карт решают неформально поставленные задачи, отличающиеся неполнотой и противоречивостью исходных данных [3, 4]. Качество сформулированных решений в значительной степени зависит от образа, который создается в сознании аналитика в процессе диалога с визуализирующей системой. Диалог включает в себя масштабирование, панорамирование изображения, изменение видовых экранов, ракурсов, изучение символьных и числовых данных визуальных объектов, обращения по ассоциативным гиперссылкам к мультимедиа-ресурсам. Подобный механизм анализа встречается в самых различных прикладных областях, непосредственно не связанных с анализом пространственных данных [5]. Карты знаний, сайты Интернет, планы онтологий и социальных сетей, схемы энергоснабжения предприятий, электронный документооборот учреждений и другое при всей специфичности своего содержания и представления анализируются аналогично.

Одной из главных проблем визуального анализа сложных карт и схем является снижение избыточности и повышение смыслового наполнения изображений [6—8]. Суть проблемы в том, что, с одной стороны, предмет анализа должен отображаться с максимальной полнотой и достоверностью, которые позволяют аналитику сформировать целостное представление о предмете. Это предполагает отображение максимально возможного количества данных. С другой стороны, включение в изображение всех данных о системе не гарантирует улучшения его смыслового содержания [9, 10]. Примером может служить задача анализа безопасности транспортных систем, предусматривающая оценку сложности транспортной инфраструктуры в заданной местности. Последняя характеризуется большим числом объектов и имеет обширное описание, что приводит к парадоксальному эффекту: пользователь-аналитик испытывает все большее затруднение в восприятии и понимании картографического изображения по мере того, как это изображение насыщается данными. В результате полезность визуализации для пользователя-аналитика падает, растет вероятность принятия неверных решений.

Как известно из психологии [11], стремление понять смысл визуального образа реализуется через "рассматривание" человеком объекта анализа. Рассматривание заключается в приближении, удалении, изменении ракурса, обходе объекта по кругу. Эквивалентом этих действий в диалоге с визуализирующей системой является панорамирование, изменение масштаба изображения, использование видов и конструирование сцен, 3D-вращение. Эффективное применение перечисленных средств требует высокой квалификации пользователя и является "узким местом" диалога с визуализирующей системой. По этой причине создание соответ-

вующих методов и программных инструментов, улучшающих понимание визуальных образов, остается актуальным.

Известные методы управления визуализацией сложных карт и схем

Теоретические исследования методов компьютерной визуализации сложных объектов проводятся в течение длительного времени [8]. Предметом исследования является не только построение реалистичных визуальных образов сложных геометрических объектов, но и диалог между пользователем и системой визуализации [9]. В процессе диалога пользователь, активно воздействуя на изображение, получает знания для решения прикладной задачи. Извлечение знаний из изображений представляет собой проблему, одним из аспектов которой является оптимизация средств манипулирования изображением. То, что удовлетворительного решения для этой задачи получить не удастся, стимулирует новые исследования [12].

Наиболее близкими к рассматриваемой в данной работе проблеме являются исследования по интеллектуальной визуализации [7—10, 13]. Общим для работ этого направления является использование знаний в процессе изучения визуальных образов. Наиболее развитым механизмом отображения характеризуется картографическая визуализация [2]. Комбинирование слоев, тематических карт и пространственных данных из разнородных источников представляет собой трудноформализуемую процедуру, цель которой состоит в создании максимально информативных картографических изображений. Как показывает анализ публикаций, проводимые исследования направлены главным образом на отбор и фиксацию знаний о структуре картографических образов. При этом вне рассмотрения остается логика манипулирования построенными изображениями, хотя именно динамичное

визуальное исследование картографических изображений приводит к получению новых знаний [11].

Анализируя инженерную сторону визуализации, следует отметить, что на сегодняшний день существует достаточно много программных средств для визуализации карт и схем. Разнообразие программных продуктов определяется различиями требований к качеству отображаемых данных. Общим является то, что объем визуализированных данных определяется "вручную" пользователем путем формирования запросов либо настройкой фильтров отбора данных. Подобная организация характерна для сетевых систем, реализующих технологию клиент — сервер. Серверы "облачных" хранилищ по очевидной причине не могут брать на себя функции управления качеством визуализации на стороне клиентов, лишь формируя потоки "сырых" данных. В качестве примера подобной визуализации на рис. 1 приведена схема инфраструктуры инженерных коммуникаций промышленного предприятия. База данных, хранящаяся на сервере, включает в себя описание зданий, сооружений, сетей энергоснабжения, подачи и отвода воды и других ресурсов. Изображение построено с помощью средств визуализации AutoCad Map 14 [14], включающих в себя программные инструменты наложения слоев и выбора видов, формирования пространственных и семантических запросов. Аналогичный способ конструирования изображений широко используется многими системами визуализации данных.

Визуальный образ, как можно видеть из рис. 1, труден для целостного восприятия и визуального анализа. Трудность восприятия обусловлена избыточностью, которая объективно возникает при отображении громоздких карт и схем. Не все элементы изображения одинаково полезны для решения прикладной задачи. Масштабирование, комбинирование слоев и панорамирование фрагментов изображения занимают достаточно много времени

и принципиально не решают проблему целостности восприятия. Занимаясь формированием изображения, аналитик теряет общее представление об изучаемом объекте. Чтобы повысить смысловой уровень изображений, пользователю требуется знание структуры информационной базы и опыт в конструировании запросов и манипулировании изображением.

Заметим, что с аналогичной проблемой повышения смыслового содержания сталкиваются при визуализации сложных схем знаний [4]. Представление абстрактных сущностей самых различных областей зна-

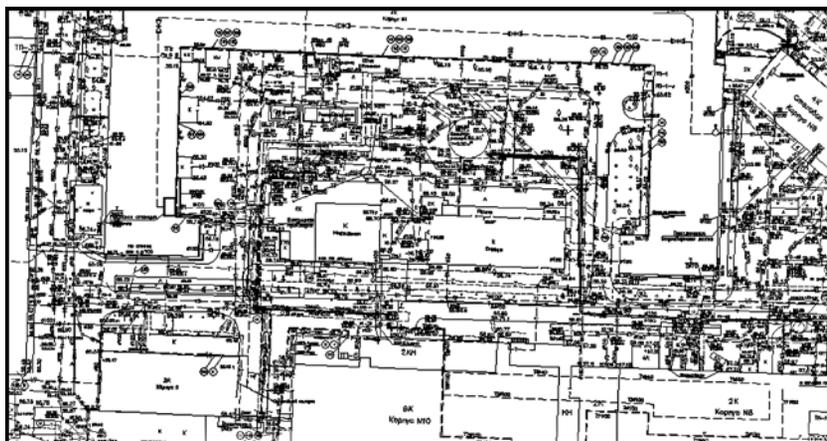


Рис. 1. Схема инфраструктуры инженерных коммуникаций предприятия

ний должно сводиться к известным и привычным для пользователей визуальным образам, метафорой которых оказывается картографическая визуализация виртуальных зданий, сооружений и транспортных коммуникаций реального мира [3].

Одним из направлений снижения избыточности сложных изображений является их генерализация. Наибольший интерес в этом смысле представляет картографическая генерализация [16]. Ее практическое применение геоинформационными сервисами Интернет (Yandex, Google, 2Gis и др.) реализуется использованием разномасштабных карт. Однако применение генерализации сопровождается утрированием изображений. Как следствие, возникает риск неверной интерпретации визуального изображения, что недопустимо в ряде прикладных областей принятия решений на основе карт и схем.

Анализ факторов, определяющих полезность визуализации

Визуализация сложных пространственно рассредоточенных систем связана с устранением избыточности визуального представления карт и схем. Избыточность порождается элементами изображения, которые в смысловом отношении не представляют интереса для решаемой задачи. Чем выше избыточность, тем менее полезно изображение для аналитика.

Сформулируем задачу оптимизации полезности визуального изображения следующим образом.

Сеанс работы с визуализацией предполагает построение и последующий анализ рабочей области множества картографических объектов $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, хранящихся в базе данных геоинформационной системы. Рабочая область $m_W \subseteq \Omega$ включает в себя картографические объекты (примитивы) ω_i , образующие картографический образ с границами

$$L_W = \{S_W, T_W, C_W\},$$

где S_W — пространственная, T_W — временная, C_W — семантическая границы. Пространственная граница S_W определяет область в пространстве схемы, элементы которой существенно важны для анализа. Временная граница T_W — значения временных интервалов существования примитивов и отношения между этими интервалами. Семантическая граница C_W включает в себя подмножество классов примитивов и отношений, играющих важную роль в анализе. Рабочая область формируется как результат исполнения последовательности запросов к геоинформационной системе (сервису) со стороны аналитика:

$$Q_i(X_S, X_T, X_C), i = \overline{0, N},$$

где X_* — соответственно пространственные, временные и семантические параметры запроса; $Q_i(X_S, X_T, X_C)$ — это предикат запроса, который строится пользователем через диалоговые меню системы.

Границы рабочей области являются первым фактором, определяющим смысловое содержание изображения. Чем меньше визуальных элементов расположено вне границ решаемой прикладной задачи, тем ниже избыточность и выше уровень смыслового содержания. Вместе с тем, существует второй фактор, влияющий на уровень смыслового содержания, — внутренняя структура рабочей области.

Структуру рабочей области $m_W \subseteq \Omega$ представим в виде объединения двух множеств:

$$m_W = B \cup E,$$

$$B \subseteq \Omega: \forall \omega_i \in B \Rightarrow \exists Q_j(X_S, X_T, X_C, X_E) = true,$$

$$j = \overline{1, N}, i = \overline{1, |\Omega|},$$

$$B \cap E = \emptyset, E \subseteq \Omega.$$

Множество B назовем остовом запроса. Остов включает в себя примитивы, свойства которых удовлетворяют предикатам запросов, сформированным пользователем в сеансе. Примитивы остова являются необходимыми, но недостаточными для понимания изображения. Множество E будем называть окружением остова. Окружение предназначено для обеспечения смысловой целостности рабочей области. Полезность предлагаемой модели состоит в выделении двух независимых процессов в построении изображения: отбора основы изображения и дополнения ее наиболее важными для восприятия и понимания элементами. Управление вторым процессом позволяет существенно изменить смысловое содержание изображения в целом.

Окружение E формируется применением экспертных правил $K(B, \Omega)$ построения образа ответа к остову запроса B :

$$\omega_i \in E \Rightarrow K(B, \Omega) = true, i = \overline{1, |m_W|}.$$

Экспертные правила $K(B, \Omega)$ отображают знания о том, как конструируются границы рабочей области m_W для заданного остова B и как полученная область заполняется примитивами окружения E . Структура правил соответствует одному из двух классов:

- правила определения границ рабочей области имеют вид

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ Соответствует(Параметры}_i(B), \\ & \text{НаборЭталонныхПараметров)} \text{ ТО ГраницаОстова} = \\ & = \text{ПостроитьГраницуСпособом}(i). \end{aligned}$$

Здесь логическая функция $\text{Соответствует}(X, Y)$ истинна, если набор параметров существующего

остова X в заданном смысле соответствует набору эталонных значений параметров Y . Соответствие задается нечеткой классификацией значений параметров. Каждый класс определяется набором нечетких ограничений на значения параметров, зависящим от прикладных задач. Функция **Параметры_i**(B) формирует набор параметров остова для данного правила. Функция **ПостроитьГраницуСпособом**(i) формирует границы остова, если его параметры соответствуют логике i -го правила. Переменная **ГраницаОстова** хранит значение вычисленных границ либо неопределенное значение **null**, если ни одно из правил базы знаний не позволило вычислить границы;

- правила отбора примитивов окружения представляются как

ЕСЛИ *ГраницаОстова* $\langle \rangle$ *null* &
СпособПостроенияГраницы = i **ТО** E =
= **ПостроитьОкружениеСпособом**(*ГраницаОстова*, i).

Функция **ПостроитьОкружениеСпособом** (...) строит множество E для заданного значения *ГраницаОстова* в зависимости от класса, номер которого задается значением i .

Применение правил $K(B, \Omega)$ ведет к сокращению избыточности изображений, но окончательно не определяет полезность изображения для анализа. Здесь должен учитываться третий фактор уровня смыслового содержания — уровень восприятия изображения. Зрительный анализатор человека имеет ограниченную пропускную способность, поэтому увеличение числа элементов изображения снижает его полезность. Считая, что мерой сложности рабочей области является число примитивов $|m_W|$, введем функцию полезности рабочей области $I(m_W)$. Ее вид отражает следующие закономерности, подтвержденные практикой визуального анализа:

- изображения с небольшим числом элементов не представляют интерес для визуального анализа. Маловероятно, что небольшое число полученных по запросу картографических элементов как-то глубоко и содержательно отображает ситуацию реального мира;
- по мере увеличения числа элементов полезность изображения должна возрастать, поскольку его новые элементы появляются благодаря запросам аналитика. Возрастание полезности обусловлено исключительно его целенаправленной деятельностью и не может ассоциироваться с добавлением произвольно взятых картографических объектов;
- существует субъективно определяемый каждым аналитиком предел сложности изображения, превышение которого ведет к снижению полезности. Интегрально этот предел определяется числом примитивов m^* , которое субъективно определяется для каждого пользователя;

- полезность чрезмерно усложняемого изображения неуклонно снижается из-за необходимости выполнять все большее число вспомогательных операций визуализации отдельных фрагментов. Трудоемкость такого процесса неизбежно приводит к потере смысла изображения в целом.

Исходя из сказанного, функцию полезности можно задать следующим образом:

$$I(m_W) = \begin{cases} 1 - (m^* - |m_W|)/m^*, & |m_W| < m^*, \\ 1, & |m_W| = m^*, \\ 1 - (|m_W| - m^*)/m_{\max}, & |m_W| > m_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь m_{\max} — максимально возможное число элементов изображения, определяемое свойствами устройства отображения. Можно видеть из соотношения (1), что максимальное значение полезности $I(m_W) = 1$ достигается в точке m^* , являющейся единственной точкой максимума. Отклонение от m^* в большую или меньшую сторону ведет к снижению полезности и $I(m_W) \rightarrow 0$.

Реализация управления визуализацией

Задачу управления визуализацией в общем виде поставим следующим образом:

$$\begin{cases} I(m_W) \rightarrow \max, \\ |m_W| = m^*, \\ m_W: Q_i(X_s, X_T, X_C, X_E) = \text{true}, i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (2)$$

Особенность данной постановки задачи состоит в том, что оптимизация полезности связывается с возможностью изменять окружение остова B . Таким образом, область допустимых решений ограничена возможностью подобрать полезные в смысловом отношении примитивы из базы данных геоинформационной системы (ГИС). Указанное свойство области решений естественным образом объясняется практикой визуального анализа: улучшить качество картографического изображения невозможно, если картографические материалы недостаточно подробны либо пользователь вручную запрашивает все необходимые для анализа сведения.

Область допустимых решений задачи (2) включает в себя локальные и глобальные экстремумы. Глобальный экстремум соответствует наилучшей степени визуального восприятия. По этой причине нами введено ограничение $|m_W| = m^*$. Число примитивов остова B , таким образом, не является единственным определяющим фактором полезности. Чем сложнее остов, тем меньше возможность наращивать число примитивов окружения из-за неизбежного падения качества восприятия изображения. Как бы ни менялось соотношение между сложностью остова и окружения, величина m^* остается неизменной и определяет конечное представление изо-

бражения. Этот факт приводит к идее использовать ее как независимую переменную при оптимизации полезности.

Управление визуализацией осуществляется через операции манипулирования изображением. Конкретные действия по достижению цели состоят в следующем:

- определяется минимально необходимый набор операций визуального анализа, который будет предоставлен аналитику в пользовательском интерфейсе системы. Например, такими могут стать операции **Упростить**, **Усложнить**, **Выбрать Окно**, **Показать Все**. Набор определяется так, чтобы сделать диалог максимально комфортным для аналитика;
- создается база знаний, состоящая из правил "разумного" отбора примитивов в рабочую область изображения. Правила разбиваются на классы соответственно профессиональной принадлежности пользователей. Например, ГИС для анализа инфраструктуры предприятия может включать в себя группы пользователей "Специалист по электроснабжению", "Специалист по водоснабжению", "Специалист системы безопасности", "Работник администрации";
- в базу знаний заносятся правила оценки важности примитивов в сеансе визуального анализа $K_s(B, E)$. Важность примитива для изучения определяется не только его связью с решаемой задачей, но и временной диаграммой процесса анализа. Не все фрагменты рабочей области изучаются аналитиком на протяжении сеанса с одинаковой интенсивностью. Поэтому неактивные фрагменты могут быть исключены из рабочей области с соблюдением ограничений целостности изображения в целом.

Задача управления визуализацией реализуется по следующему алгоритму:

1) текущая операция визуального анализа исполняется как запрос к базе данных ГИС на отбор примитивов. Примитивы добавляются в множество остова запроса рабочей области B ;

2) определяются границы пространственной, семантической и временной оболочки рабочей области с модифицированным множеством B . Для этого к примитивам B применяются правила отбора окружения $K(B, \Omega)$. Строится промежуточный набор примитивов, в котором находятся только примитивы остова и окружения;

3) с помощью правил $K_s(B, E)$ промежуточный набор примитивов сортируется в порядке убывания их значимости;

4) из промежуточного набора примитивов удаляется наименее важная часть последовательности, такая что суммарная сложность оставшейся после-

довательности составляет величину m^* . Полученное множество считается рабочей областью;

5) модифицированная рабочая область визуализируется.

Приведенный алгоритм реализуется при вызове каждой операции визуального анализа.

Экспериментальная реализация процедуры визуализации

Для оценки возможности практической реализации описанного алгоритма управления был разработан программный макет в системе AutoCad Map 14. Для разработки программ и правил был использован язык AutoLisp, являющийся встроенным языком программирования для AutoCad. Библиотека функций AutoLisp расширена специализированными функциями обработки примитивов, доступа к базе данных карт и схем, поиска и обработки совокупностей примитивов. Достоинством применения языка AutoLisp оказалась возможность описывать и загружать в процессе работы системы экспертные правила управления отбором примитивов и их сортировки.

Эксперимент заключался в оценке сложности и изменении полезности изображений, конструируемых при решении задач управления инженерной инфраструктурой предприятия. Исходная схема показана на рис. 1. Все элементы электронной карты распределены между 52 слоями, которые в данном изображении включены, т.е. визуализированы. Сложность карты, измеряемая числом примитивов, составляет $m_0 \approx 21\ 000$. Знак приближенного равенства в данном случае отражает корректировку, необходимую при использовании векторной графики. Это вызвано особенностями внутреннего представления примитивов в системе AutoCad Map. Например, полилиния может быть построена из большого числа небольших сегментов, которые вносят непропорциональный вклад в оценку сложности. Аналогично один примитив вхождения блока из большого числа примитивов явно занижает сложность восприятия повторяющихся элементов карты или схемы.

Субъективно определенный пользователем-аналитиком максимум полезности изображения на экране составил $m^* \approx 60$. Возможные отклонения от указанного значения были оценены в 20 %. Заметим, что "мягкое" определение граничных значений характерно для рассматриваемой задачи. Нечеткая модель представления экспертных знаний для этого случая описана в работах [17, 18].

Для управления визуализацией были введены операции **Обобщить**, **Детализировать**, **Сдвинуть**, **Выбрать Область**, **Показать Все**. В отличие от стандартных для AutoCad Map 14 операций PAN и ZOOM с опциями Window и Extents введенные операции изменяют сложность изображения для

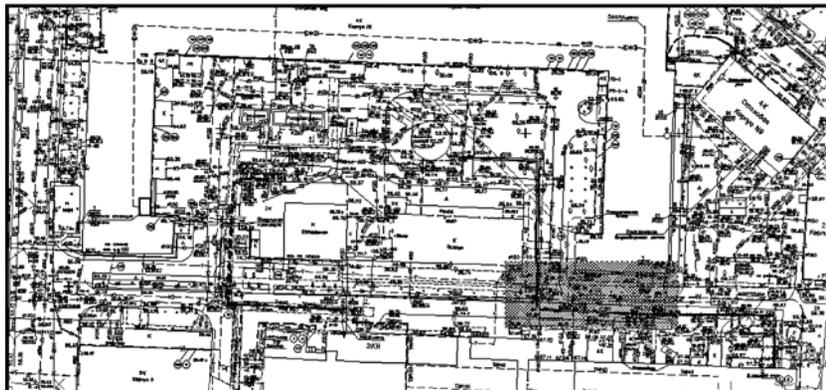


Рис. 2. Общая схема с областью анализа (заштрихована)

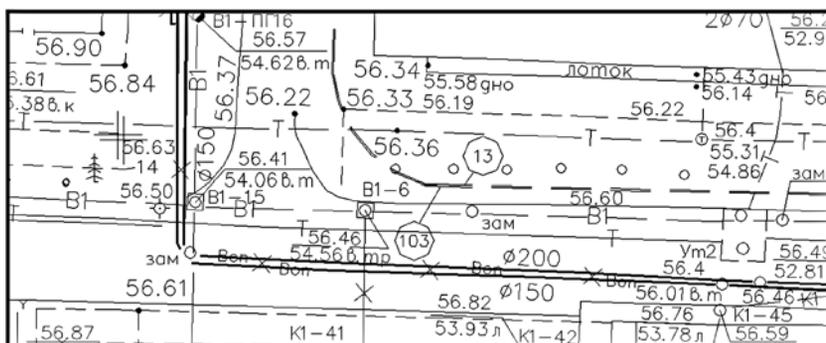


Рис. 3. Рабочая область, выделенная стандартными средствами

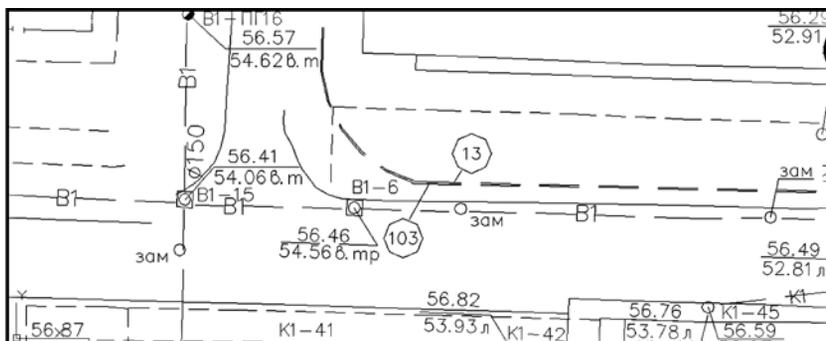


Рис. 4. Рабочая область для специалиста по инженерным коммуникациям

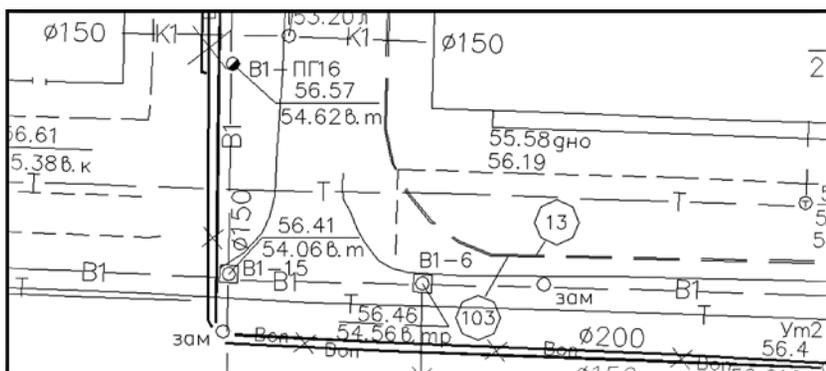


Рис. 5. Рабочая область после выполнения операций Детализировать

достижения их максимальной полезности. В эксперименте рассматривалась визуализация для класса "Специалист по инженерным коммуникациям". Требуемые для класса объекты — основные кабельные трассы высокого и низкого напряжения, гидрокоммуникаций с прилегающими зданиями и инженерными сооружениями. На рис. 2 штриховкой показана предполагаемая область анализа. Выбор отмеченной области с помощью стандартной функции AutoCad 14 дает изображение (рис. 3) с числом примитивов $m_1 \approx 230$. Полезность полученного изображения низка, что заставляет аналитика комбинировать примитивы, слои и находить приемлемое представление плана. На рис. 4 показано изображение после автоматической оптимизации. Для выбора рабочей области была применена операция **Выбрать Область**. Соответственно экспертным правилам выключены избыточные слои и удалены примитивы за пределами пространственной границы. Сложность полученного изображения составила $m_2 \approx 29$ примитивов.

Принципиальным отличием рабочей области на рис. 4 является отсутствие несущественных по смыслу элементов. В частности, не показаны несколько видов производственной канализации, воздухопроводы и паропроводы, а также линии связи и теплотрассы. Их присутствие не влияет на решение задач в контексте анализа и синтеза инженерных коммуникаций: оценки состояния, планирования ремонта, принятия решений в аварийных ситуациях.

Пользователю может потребоваться информация о размещении коммуникаций других типов. Операция **Детализировать** позволяет "разумно" дополнить изображение новыми типами примитивов. На рис. 5 показан вид экрана после выполнения над рабочей областью операции **Детализировать**. Число примитивов изображения составляет $m_3 \approx 38$. Изучение изображения путем панорамирования сохраняет смысл выбранной детализации.

Операция **Обобщить** предусматривает уменьшение масштаба отображения и отбор существенно важных ком-

муникаций при большем числе примитивов. На рис. 6 приведен пример результата выполнения операции **Обобщить** для рассматриваемой рабочей области. Число примитивов возросло до $m_4 \approx 82$. Подчеркнем, что обобщение в рассматриваемой ситуации не предполагает введение объектов концептуально более высокого уровня. Сокращение сложности достигается за счет сужения пространственной оболочки. Визуализация исключает больше примитивов, находящихся вне зоны близости к основным инженерным коммуникациям. Достоинством полученного изображения является отображение наиболее важных пространственных отношений между линиями коммуникаций и наземными сооружениями.

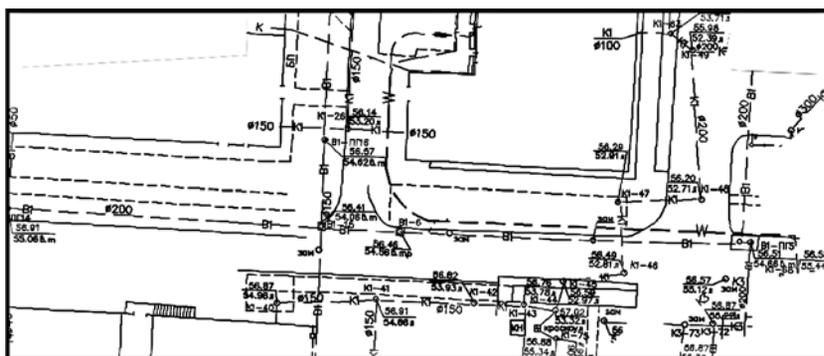


Рис. 6. Рабочая область после выполнения операции *Обобщить*

Изменение класса профессиональной направленности визуального анализа влияет на вид изображений. На рис. 7 показана визуализация рабочей области для класса "Специалист по теплоснабжению". Переключение выполнено для ранее сформированной рабочей области. Отличительной особенностью визуализации является компактность пространственной оболочки, заданной набором правил класса "Специалист по теплоснабжению".

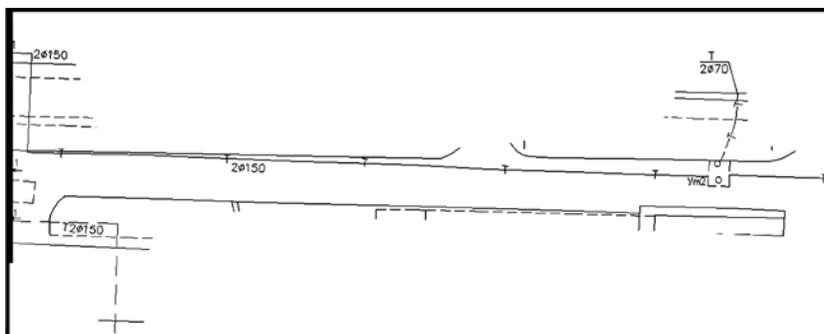


Рис. 7. Рабочая область специалиста по теплосетям

Возможность переключаться при анализе на различные классы профессиональной ориентации дает инструмент изменения "семантического ракурса" изображения. Оно наполняется примитивами других типов, изменяется форма пространственной области. Как следствие, изменяется смысловое восприятие изображения. Подобного рода трансформации полезны тем, что стимулируют генерацию новых решений прикладной задачи.

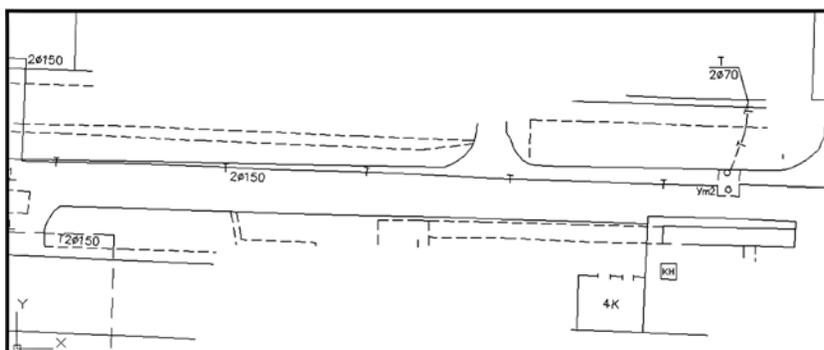


Рис. 8. Рабочая область при $m^* \approx 70$

Следует отметить, что качественно иной результат восприятия может дать изменение значения m^* . На рис. 8 показана визуализация рабочей области, показанной на рис. 7, для $m^* \approx 70$. Повышение порога сложности используется для уже знакомых пользователю (использовавшихся ранее) фрагментов схемы. По существу, учитывается тренированность зрительного аппарата пользователя.

Заклучение

Подводя итог, необходимо отметить, что поставленная задача управления визуализацией позволила по-новому решать проблему восприятия слож-

ных планов и схем. За счет введения порога сложности, при котором максимизируется полезность изображения, удается достичь уровня восприятия смыслового содержания, который минимизирует вероятность принятия ошибочных решений. Подобная ситуация имеет место при анализе сложных схем и карт во время поиска решений трудноформализуемых задач.

Особенностью предложенной методики визуализации является отсутствие генерализующих графических объектов, которыми могут заменяться фрагменты схем. Отказ от подобного механизма объясняется потерей достоверности из-за утрирования, применяемого при конструировании генерализующих объектов.

Предложенный механизм дает особые инструменты управления визуализацией: изменение порога сложности изображения и класса правил отражения профессиональной принадлежности пользователя. В сочетании с известными инструментами манипулирования изображением подобный прием дает новую возможность поиска и оценки решений в сложных ситуациях.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении самообучения и адаптации к поведению пользователя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 17-01-00119 и № 17-01-00060.

Список литературы

1. **Shashi S., Hui X.** Encyclopedia of GIS. New York: SpringerScience + Buisiness Media, 2008.
2. **Longley P. A., Goodchild M., Maguire D. J., Rhind D. W.** Geographic Information Systems and Sciences, 3rd ed., Wiley, 2011.
3. **Averbukh V.** Semiotic approach to forming the theory of computer visualization // Scientific Visualization. 2013. Vol. 5, N. 1. P. 1—25.
4. **Pilyugin V., Malikova E., Pasko A., Adzhiev V.** Scientific visualisation as method of scientific data analysis // Scientific Visualization. 2012. Vol. 4, N. 4. P. 56—70.
5. **Cybulski J. L., Keller S., Nguyen L., Saundage D.** Creative problem solving in digital space using visual analytics // Computers in Human Behavior. 2015, N. 42. P. 20—35.
6. **Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.** The intuitive cartographic representation in decision-making // World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science. 2016. Vol. 10. P. 13—18.
7. **Cranley N., Perry P., Murphy L.** Dynamic content-based adaptation of streamed multimedia // Journal of Network and Computer Applications. 2007. N. 30. P. 983—1006.
8. **Lindholm M., Sarjakovski T.** Designing a Visualization User Interface // Modern Cartography Series. 1994. Vol 2. P. 167—184.
9. **Keim D. A.** Information visualization and visual data mining // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2002. N. 8 (1). P. 1—8.
10. **Taylor D. R., Lauriault T. P.** Conclusion and the Future of Cybercartography // Developments in the Theory and Practice of Cybercartography, Applications and Indigenous Mapping. 2014. Vol. 5. P. 343—350.
11. **Gibson J. J.** The Ecological Approach to the Visual Perception of Pictures. Pergamon Press Ltd. 1978.
12. **Burigat S., Chittaro L.** Interactive visual analysis of geographic data on mobile devices based on dynamic queries // Journal of Visual Languages and Computing. 2008. N. 19. P. 99—122.
13. **Shi W., Kwan K., Shea G., Cao J.** A dynamic data model for mobile GIS // Computers & Geosciences. 2009. N. 35. P. 2210—2221.
14. **URL:** <https://www.autodesk.ru/products/autocad-map-3d/overview> (дата обращения: 31.05.17).
15. **Taillandier P., Taillandier F.** Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalization // European Journal of Operational Research. 2012. N. 217 (3). P. 633—642.
16. **Woods J.** Standard logics and theories of argument and inference. Deduction // Studies in Logic and Practical Reasoning. 2002. Vol. 1. P. 41—103.
17. **Belyakov S. L., Bozhenyuk A. V., Belykova M. L., Rozenberg I. N.** Model Of Intellectual Visualization Of Geoinformation Service // Proc. 28th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2014. 2014. P. 326—333.
18. **Belyakov S., Rozenberg I., Belyakova M.** Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. 2013. Part I. P. 510—521.

S. L. Belyakov, D. Sc., Professor, e-mail: beliacov@yandex.ru,

M. L. Belyakova, Ph. D., Assistant Professor, e-mail: mlbelyakova@sfedu.ru,

M. N. Savelyeva, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: msavelyeva@sfedu.ru,

Southern Federal University, Taganrog, Russia

Intelligent Control of the Dialogue in the Visual Analysis of Complex Maps and Schemes

We consider the problem of visual analysis of complex plans, schemes and maps for solving of difficult formalized tasks. We analyze the dependence of the level of perception upon the visualization complexity. We introduce the concept of the utility of the visual image, it is described by the behavior of the empirical utility function. The utility function depends on the number of graphic primitives of the image. The function takes a maximum value in the case where the number of primitives coincides with the limiting subjective level of perception of the user. This value is specified when configuring the visualization system. We propose an optimization model of the utility, which is based on picture representation by two components. The first component is a skeleton of workspace. The skeleton includes primitive attributes of map or scheme, which selected from a database corresponding to the user's request. The second component is the skeleton environment intended for filling of the skeleton by information details. The environment primitive attributes increase the semantic level of visualization. Selection of the environment primitive attributes is provided by a set of expert rules. The set of rules is divided into classes corresponding to the professional user orientation. We give a formal statement of the optimization problem of visualization utility. It describes the operation of picture manipulation. Examples are shown of practical applications of visualization for two classes of visual images.

Keywords: visual analysis, intelligent control, cartographic visualization, geoinformation systems, visualization

References

1. **Shashi S., Hui X.** *Encyclopedia of GIS*. New York: Springer-Science + Business Media, 2008.
2. **Longley P. A., Goodchild M., Maguire D. J., Rhind D. W.** *Geographic Information Systems and Sciences*, 3rd ed., Wiley, 2011.
3. **Averbukh V.** Semiotic approach to forming the theory of computer visualization, *Scientific Visualization*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 1–25.
4. **Pilyugin V., Malikova E., Pasko A., Adzhiev V.** Scientific visualisation as method of scientific data analysis, *Scientific Visualization*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 56–70.
5. **Cybulski J. L., Keller S., Nguyen L., Saundage D.** Creative problem solving in digital space using visual analytics, *Computers in Human Behavior*, 2015, no. 42, pp. 20–35.
6. **Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.** The intuitive cartographic representation in decision-making, *World Scientific Proceeding Series on Computer Engineering and Information Science*, 2016, vol. 10, pp. 13–18.
7. **Cranley N., Perry P., Murphy L.** Dynamic content-based adaptation of streamed multimedia, *Journal of Network and Computer Applications*, 2007, no. 30, pp. 983–1006.
8. **Lindholm M., Sarjakovski T.** Designing a Visualization User Interface, *Modern Cartography Series*, 1994, vol. 2, pp. 167–184.
9. **Keim D. A.** Information visualization and visual data mining, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002, no. 8 (1), pp. 1–8.
10. **Taylor D. R., Lauriault T. P.** Conclusion and the Future of Cybercartography, *Developments in the Theory and Practice of Cybercartography, Applications and Indigenous Mapping*, 2014, vol. 5, pp. 343–350.
11. **Gibson J. J.** *The Ecological Approach to the Visual Perception of Pictures*. Pergamon Press Ltd. 1978.
12. **Burigat S., Chittaro L.** Interactive visual analysis of geographic data on mobile devices based on dynamic queries, *Journal of Visual Languages and Computing*, 2008, no. 19, pp. 99–122.
13. **Shi W., Kwan K., Shea G., Cao J.** A dynamic data model for mobile GIS, *Computers & Geosciences*, 2009, no. 35, pp. 2210–2221.
14. **Available** at: <https://www.autodesk.ru/products/autocad-map-3d/overview> (дата обращения: 31.05.17).
15. **Taillandier P., Taillandier F.** Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalization, *European Journal of Operational Research*, 2012, no. 217 (3), pp. 633–642.
16. **Woods J.** Standard logics and theories of argument and inference. Deduction, *Studies in Logic and Practical Reasoning*, 2002, vol. 1, pp. 41–103.
17. **Belyakov S. L., Bozhenyuk A. V., Belykova M. L., Rozenberg I. N.** Model Of Intellectual Visualization Of Geoinformation Service. *Proc. 28th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2014*, 2014, pp. 326–333.
18. **Belyakov S., Rozenberg I., Belyakova M.** *Approach to Real-Time Mapping, Using a Fuzzy Information Function. Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*. 2013. Part I, pp. 510–521.



12 по 14 декабря 2017 г. в Москве на базе
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
состоится

XVII международная
научно-практическая конференция
**СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
И УПРАВЛЕНИЯ ЭТАПАМИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОДУКТА
(CAD/CAM/PDM-2017)**

Тематика конференции:

- Организация структур технических и программных средств проектирования и управления.
- Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты.
- Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах.
- Средства виртуальной реальности в промышленных системах.
- Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами.
- PDM-системы.
- Проектирование в машиностроении и строительстве.
- Проектирование в радиоэлектронике.
- Инженерные расчёты. CAE-системы.

Адрес оргкомитета:

117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная 65, ИПУ РАН,
Оргкомитет конференции CAD/CAM/PDM-2017.
Телефон для справок: (495) 334 – 93-50; моб. (909) 624 – 43-31.
Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://lab18.ipu.ru/projects/conf2017/>

В. И. Левин, д-р техн. наук, проф.,
Пензенский государственный технологический университет

Моделирование и количественная оценка эффективности научных исследований

Изложена суть библиометрического подхода к моделированию и оценке результатов научных исследований. Рассмотрены основы теории библиометрических показателей. Установлены исходные данные для оценки этих показателей. Предложены два универсальных метода указанной оценки — измерительный и метод моментов. Приведены примеры вычисления оценок этими методами. Проведенное исследование показало, что вычисление библиометрических показателей является лишь первым этапом процесса оценки результата научных исследований, за которым должен следовать второй этап — экспертная оценка.

Ключевые слова: моделирование науки, библиометрика, публикация, индекс цитирования, эффективность научных исследований

Введение

Научная деятельность имеет все возрастающее значение для человечества, давая ему фактически единственный шанс на решение стоящих перед ним трудных проблем: рост народонаселения, защита окружающей среды, победа над терроризмом и т.д. Однако поддержка науки требует огромных средств. Поэтому государства заинтересованы в том, чтобы внедрить сугубо количественные методы оценки качества научных исследований, которые соответствовали бы существующей в настоящее время сугубо количественной системе финансовой поддержки науки. Первой за эту работу взялась Англия, занимающая в настоящее время второе место в мире после США по уровню развития научных исследований. Позиция английского правительства по этому вопросу была ясно изложена в его докладе 2007 г. [1]: "Правительство намерено заменить нынешний метод определения качества научных исследований. В центре внимания новой системы будут подсчеты, а не экспертные оценки. Ожидается, что основной индекс оценки качества в этой системе будет библиометрическим, использующим подсчет журнальных статей и их цитирований". Соответствующий подход к оценке качества научных исследований стал внедряться сначала в Англии, а затем и в остальных странах мира. Однако вскоре научная общественность забила тревогу. В 2008 г. Международный математический союз опубликовал отчет о возможностях библиометрических показателей для объективной оценки качества научных исследований [2]. Авторы этого отчета пришли к выводу, что использование взамен

экспертных оценок библиометрических показателей, основанных на публикациях и их цитированиях, не исключает субъективизм в оценке качества научных исследований, а всего лишь заменяет один вид субъективных оценок (экспертные оценки) другим их видом (субъективная интерпретация смысла количественных оценок публикаций и их цитирований). Подробное изложение отчета [2] и его выводов приведены в работе [3]. После опубликования отчета [2] научно развитые страны стали пересматривать свое отношение к библиометрическому измерению науки. Особенно далеко пошла Англия, где в 2013 г. использование библиометрики как основного метода оценки научной деятельности было запрещено и заменено экспертной оценкой [4]. Библиометрические показатели разрешили применять только как вспомогательные и лишь в 11 из 36 научных дисциплин (подробнее см. в работе [3]). Исследование основных библиометрических показателей — публикации, цитируемость, индекс Хирша — было проведено недавно в России [5—11]. Общий вывод из проведенных исследований состоит в том, что все эти показатели не позволяют объективно оценить вклад ученого в науку, сравнить эффективность исследований различных ученых и т.д. Особенно резкой критике подвергся показатель "индекс Хирша", который, по мнению части исследователей, в ряде случаев приводит к результатам, противоречащим здравому смыслу. Кроме того, он оказался не защищенным от искусственного "накручивания". Наиболее полное исследование библиометрических показателей, охватывающее практически все известные на сегодня показатели научной деятельности, проведено в работе [3]. Это

исследование показало, что ни один из почти 30 существующих в настоящее время библиометрических показателей не может использоваться в качестве основного показателя, позволяющего объективно оценивать вклад ученого в науку, сравнивать достижения различных ученых, выделять выдающихся ученых и т.д. Однако эти показатели могут быть использованы в качестве вспомогательных, в дополнение к экспертным оценкам, которые традиционно являются главным показателем, оценивающим вклад ученого в науку. К сожалению, широкое использование библиометрических показателей тормозится полным отсутствием их теории, позволяющей систематически вводить указанные показатели, изучать их свойства и устанавливать области применения каждого из показателей. Настоящая работа содержит попытку наметить некоторые основы такой теории.

1. Исходные данные для оценки библиометрических показателей

Исходными данными для библиометрических показателей эффективности научных исследований ученого являются его публикации и ссылки на них. При этом представляют интерес не сами публикации и ссылки, а только число публикаций и число ссылок на каждую из них. Все ссылки считаются равноправными, независимо от их содержания и публикации, на которую они сделаны. Все публикации также считаются исходно равноправными, независимо от их содержания. Неравноправными они считаются лишь в смысле числа ссылок на них, которое может быть неодинаковым. Совокупность всех публикаций ученого и числа ссылок на каждую из этих публикаций назовем распределением ссылок данного ученого. Распределение ссылок будем представлять в форме таблицы (табл. 1) или графика (рис. 1), где публикации следуют в порядке возрастания числа ссылок

Таблица 1

| | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| № публикации i | 1 | 2 | 3 | 4 | ... | p |
| Число ссылок n_i | n_1 | n_2 | n_3 | n_4 | ... | n_p |

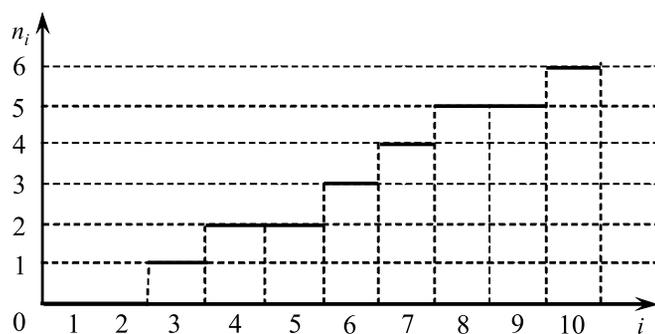


Рис. 1

на них, а напротив каждой публикации проставляется число ссылок на нее. Распределение ссылок ученого содержит полную информацию для получения библиометрических показателей эффективности его научных исследований.

В основе определения и вычисления библиометрических показателей эффективности научных исследований лежит сравнение распределений ссылок каждого из ученых, которое и позволяет сравнить эффективность этих ученых и выделить более эффективного из них. Сравнение распределений ссылок осуществляется путем сравнения числа ссылок для каждой пары публикаций двух ученых с одинаковым порядковым номером и последующего объединения полученных результатов сравнений. Для того чтобы такое сравнение было возможно, нужно, чтобы сравниваемые распределения ссылок имели равное число публикаций. Такие распределения будем называть нормальными. Любую пару распределений ссылок, не являющихся нормальными, можно нормализовать. Для этого достаточно к распределению с меньшим числом публикаций добавить такое число "пустых" публикаций (т.е. публикаций, не имеющих ссылок), чтобы оба распределения ссылок оказались с равным числом публикаций. Очевидно, что нормализация распределений ссылок не изменяет оценку эффективности научных исследований ученого и потому допустима как средство, облегчающее получение такой оценки. Также очевидно, что добавляемые при нормализации распределения ссылок пустые публикации должны располагаться в самом начале распределения, т.е. в крайней левой его части. Так, например, расположены публикации 1, 2 в распределении на рис. 1.

2. Измерительный метод оценки библиометрических показателей

Предлагаемый метод оценки библиометрических показателей эффективности научных исследований базируется на общей теории измерений. Конкретно он заключается в сравнении распределений ссылок двух ученых, которое позволяет сравнить эффективность исследований этих ученых и выделить более эффективного из них. Как уже говорилось выше, сравнение распределений ссылок осуществляется путем сравнения числа ссылок для каждой пары публикаций рассматриваемых двух ученых с одинаковым порядковым номером и последующего объединения полученных результатов сравнений. При этом ненормализованные пары распределений ссылок предварительно нормализуются, после чего число публикаций у них становится одинаковым.

Изложение предлагаемого метода начнем с простейшего случая, когда кривые сравниваемых распределений ссылок двух ученых не пересекаются (рис. 2). Будем далее исходить из следующих поло-

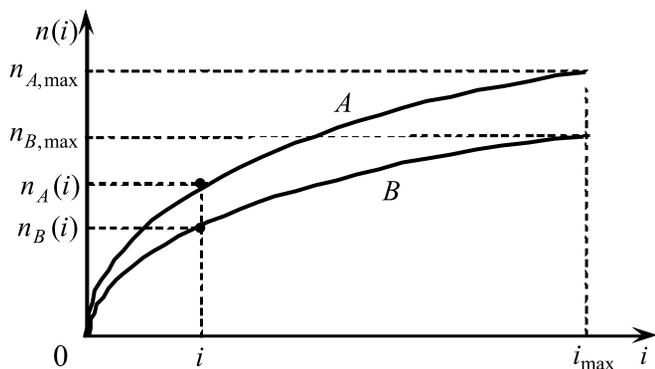


Рис. 2

жений, представляющихся очевидными: 1) эффективность научных исследований ученого некоторым образом связана с числом его публикаций (точнее, публикаций, на которые имеются ссылки) и числом ссылок на эти публикации; 2) эффективность научных исследований тем выше, чем больше число публикаций ученого и число ссылок на эти публикации. Возьмем на рис. 2 произвольную точку i на оси абсцисс. Ей соответствует точка на кривой распределения ссылок A с ординатой $n_A(i)$ и точка на кривой распределения ссылок B с ординатой $n_B(i)$, причем $n_A(i) > n_B(i)$. Это означает, что для каждой пары публикаций ученых A и B с одинаковым порядковым номером $i, i = \overline{1, i_{\max}}$, число ссылок на публикацию ученого A превышает число ссылок на публикацию ученого B . Объединяя полученные результаты для всех $i, i = \overline{1, i_{\max}}$, приходим к выводу, что в рассмотренном случае общее число ссылок на все публикации ученого A больше, чем ученого B . Таким образом, эффективность исследований $E(A)$ ученого A , кривая распределения ссылок которого располагается на графике выше, заведомо больше, чем эффективность исследований $E(B)$ ученого B . Выведенное положение запишем в виде правила:

$$E(A) > E(B), \text{ если } N(A) > N(B). \quad (1)$$

Здесь $N(A)$ — общее число ссылок на все публикации ученого A , а $N(B)$ — то же для ученого B .

Перейдем к более сложному случаю, когда кривые сравниваемых распределений пересекаются, так что на одних участках выше расположена одна кривая распределения ссылок, а на других — другая кривая (рис. 3). В этом случае, согласно сказанному выше, на одних участках кривой большей является эффективность исследований ученого A , на других — эффективность исследований ученого B . В нашем конкретном случае (рис. 3) на участке 1 большая эффективность исследований у ученого A , а на участке 2 — у ученого B . Чтобы определить соотношение общей эффективности исследований двух ученых на всем интервале существования их

распределений ссылок, нужно совместить их частные эффективности, соответствующие однородным участкам их кривых распределений ссылок. Последнее выполняется подсчетом суммарного числа публикаций $N(A)$ ученого A на всех участках, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A больше эффективности $E(B)$ ученого B , и суммарного числа публикаций $N(B)$ ученого B на всех участках, где эффективность исследований $E(B)$ ученого B больше эффективности исследований $E(A)$ ученого A . После этого выполняется сравнение чисел $N(A)$ и $N(B)$ и затем принимается решение о соотношении общих эффективностей исследований $E(A), E(B)$ ученых A и B по правилу

$$\begin{aligned} E(A) > E(B), & \text{ если } N(A) > N(B); \\ E(B) > E(A), & \text{ если } N(B) > N(A); \\ E(A) = E(B), & \text{ если } N(A) = N(B). \end{aligned} \quad (2)$$

Правило сравнения (2) исходит из того, что числа $N(A), N(B)$ можно рассматривать как количества случаев, в которых выше эффективность исследований соответственно ученого A и ученого B .

Сравнение по формуле (2) является чисто качественным; оно показывает лишь, чья эффективность исследований больше — ученого A или ученого B , но не устанавливает, на сколько (во сколько раз) больше. Однако по тем же самым данным, по которым выполняется качественное сравнение по формуле (2), можно выполнить и количественное сравнение, показывающее количественное отношение эффективности исследований ученых A, B . Действительно, в соответствии со смыслом чисел $N(A)$ и $N(B)$ как количества случаев, в которых выше эффективность исследований ученого A и B , количественное соотношение $K(A/B)$ эффективности исследований $E(A)$ и $E(B)$ ученых A и B можно измерять простым отношением чисел $N(A), N(B)$. Таким образом, искомое соотношение эффективностей, определяемое как

$$K(A/B) = E(A)/E(B), \quad (3)$$

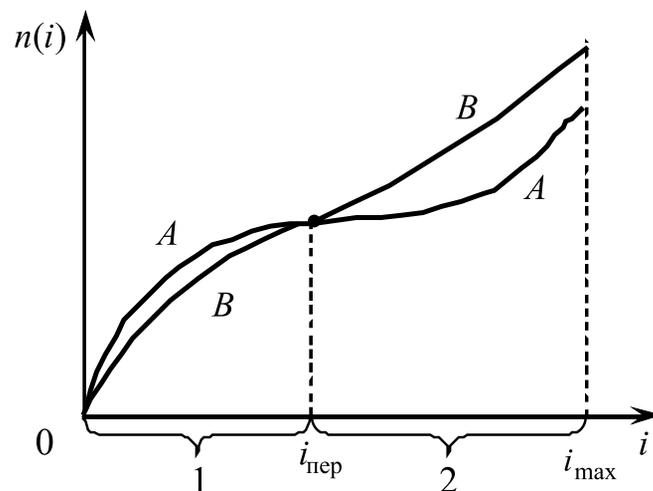


Рис. 3

можно вычислить по формуле

$$K(A/B) = N(A)/N(B). \quad (4)$$

Рассмотренное качественное и количественное сравнение эффективности исследований двух ученых по формулам (2) и (4) базировалось на числе публикаций данных ученых. Изложим теперь метод сравнения эффективности исследований ученых, базирующийся на числе ссылок на их публикации. Начнем с простейшего случая, когда кривые сравниваемых распределений ссылок двух ученых не пересекаются (см. рис. 2). Обозначим $M(A)$ общее число ссылок на публикации ученого A , а $M(B)$ — общее число ссылок на публикации ученого B . При этом в $M(A)$ и $M(B)$ не будем включать ссылки на публикации с номерами i , в которых число ссылок у A и B одинаково, так как они не влияют на результат сравнения. Такие публикации возможны на начальном (при малых i) участке сравниваемых распределений ссылок. В рассматриваемом случае, как хорошо видно из рис. 2, общее число ссылок $M(A)$ на публикации ученого A больше общего числа $M(B)$ на публикации ученого B , в соответствии с чем эффективность исследований $E(A)$ ученого A должна быть признана выше эффективности исследований $E(B)$ ученого B . Это положение можно записать в виде следствия

$$E(A) > E(B), \text{ если } M(A) > M(B). \quad (5)$$

Как и в (2), сравнение по формуле (5) — качественное, оно показывает только, при каком условии эффективность исследований ученого A больше эффективности исследований ученого B , но не показывает, на сколько (во сколько раз) больше. Но по тем же самым данным можно выполнить и количественное сравнение, определив количественное соотношение $K(A/B)$ эффективности исследований ученых A и B (3). Для этого достаточно использовать очевидную формулу

$$K(A/B) = M(A)/M(B). \quad (6)$$

Рассмотрим теперь более сложный случай, когда кривые сравниваемых распределений ссылок на публикации двух ученых пересекаются (см. рис. 3). В данном случае на одних участках выше расположена одна кривая распределения ссылок, а на других — другая. То есть на одних участках больше ссылок на публикации ученого A и потому его исследования должны быть признаны более эффективными, а на других участках — больше ссылок на публикации ученого B и потому здесь исследования этого ученого должны быть признаны более эффективными. В нашем конкретном случае (рис. 3) на участке 1 имеем большую эффективность исследований ученого A , а на участке 2 — ученого B . Для того чтобы определить соотношение общей эффективности исследований двух ученых на всем интервале их распределений ссылок, нужно соединить их частные эффективности исследований, соответствующие однородным участкам их кривых рас-

пределений ссылок. Это выполняется подсчетом суммарного числа ссылок $M'(A)$ ученого A на всех участках, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A больше эффективности исследований $E(B)$ ученого B , и суммарного числа ссылок $M'(B)$ ученого B на всех участках, где эффективность исследований $E(B)$ ученого B больше эффективности исследований $E(A)$ ученого A . При этом, как и выше, в $M'(A)$ и $M'(B)$ не включаются ссылки на все публикации с номерами i , в которых число ссылок у A и B одинаково, так как они не влияют на результат сравнения. Далее числа $M'(A)$, $M'(B)$ сравниваются и принимается решение о соотношении общих эффективностей $E(A)$ и $E(B)$ двух ученых в соответствии с правилом

$$\begin{aligned} E(A) > E(B), & \text{ если } M'(A) > M'(B); \\ E(B) > E(A), & \text{ если } M'(B) > M'(A); \\ E(A) = E(B), & \text{ если } M'(A) = M'(B). \end{aligned} \quad (7)$$

Сравнение эффективностей исследований по формуле (7), как и аналогичные сравнения по формулам (2) и (5), является качественным. Оно лишь устанавливает достаточные условия, при выполнении которых эффективность исследований одного ученого больше или равна эффективности другого ученого, но не показывает, на сколько (во сколько раз) больше. Однако, как и выше, по имеющимся данным можно выполнить и количественное сравнение, получив соотношение $K(A/B)$ эффективности исследований ученых A и B . Для этого используем очевидную формулу, подобную формулам (4), (6):

$$K(A/B) = M'(A)/M'(B). \quad (8)$$

Ранее мы занимались лишь сравнительным изучением эффективности научных исследований, оценивая соотношение эффективности исследований различных ученых. Перейдем теперь к абсолютной оценке эффективности научных исследований, т.е. к оценке эффективности исследований одного отдельно взятого ученого. Будем исходить из общей теории измерений. Согласно этой теории абсолютное значение любой измеримой величины есть отношение этой величины к некоторой другой измеримой величине, принимаемой за единицу — эталон. В рассматриваемом случае в качестве единицы — эталона измерений естественно принять ученого с минимальной положительной эффективностью исследований. Это ученый, на каждую публикацию которого имеется ровно одна ссылка, так что его можно обозначить I ; соответствующее распределение ссылок имеет вид табл. 2. Эффективность исследований такого ученого, которую мы приняли за единицу измерений, обозначим $E(I)$.

Таблица 2

| | | | | | |
|--------------------|---|---|---|-----|-----|
| № публикации i | 1 | 2 | 3 | ... | p |
| Число ссылок n_i | 1 | 1 | 1 | ... | 1 |

Теперь понятно, что для того чтобы получить абсолютную оценку эффективности исследований любого ученого A , надо просто вычислить количественное соотношение $K(A/I)$ эффективности исследований ученого A и единичного ученого I . Согласно формуле (3) общее определение абсолютной эффективности исследований ученого A имеет вид

$$K(A/I) = E(A)/E(I). \quad (9)$$

Таким образом, для получения абсолютной оценки эффективности исследований любого ученого A остается всего лишь использовать подходящую формулу вычисления количественного соотношения эффективности исследований этого ученого $E(A)$ и единичного ученого $E(I)$. Различные ее варианты можно получить из рабочих формул (4), (6), (8) вычисления количественного соотношения эффективности исследований двух ученых A, B , соответствующих различным критериям сравнения ученых. В результате получаем, во-первых, формулу

$$K(A/I) = N(A)/N(I) \quad (10)$$

для вычисления абсолютной оценки эффективности исследований ученого A в случае, когда ученые сравниваются по числу публикаций на участках распределений ссылок с различным соотношением числа ссылок между этими учеными. В этой формуле $N(A)$ — суммарное число публикаций ученого A на всех участках распределения ссылок, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A больше эффективности исследований $E(I)$ единичного ученого I (другими словами, она больше единицы), а $N(I)$ — суммарное число публикаций ученого A на всех участках распределения ссылок, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A меньше, чем эффективность исследований $E(I)$ ученого I (т.е. $E(A)$ меньше единицы, другими словами, равна нулю). Во-вторых, получаем формулу

$$K(A/I) = M(A)/M(I), \quad (11)$$

которая дает абсолютную оценку эффективности исследований ученого A , когда ученые сравниваются по числу ссылок на их публикации. Здесь $M(A)$ — общее число ссылок на публикации ученого A , а $M(I)$ — общее число ссылок на публикации ученого I (в $M(A)$ и $M(I)$ не включаются ссылки на публикации с номерами, где число ссылок у A и I одинаково). Наконец, получим формулу

$$K(A/I) = M'(A)/M'(I) \quad (12)$$

для вычисления абсолютной оценки эффективности исследований ученого A в случае, когда ученые сравниваются по числу эффективных ссылок на их публикации, т.е. ссылок на публикации, находящиеся в областях распределения ссылок с большей эффективностью исследований оцениваемого ученого. Здесь $M'(A)$ — суммарное число ссылок ученого A на всех участках распределения ссылок, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A боль-

ше эффективности исследований $E(I)$ ученого I (т.е. > 1), а $M'(I)$ — суммарное число ссылок ученого I на всех участках распределения ссылок, где эффективность исследований $E(A)$ ученого A меньше значения эффективности исследований $E(I)$ ученого I (т.е. меньше единицы, другими словами, равна нулю).

Поделив абсолютную оценку эффективности исследований $K(A/I)$ некоторого ученого A на абсолютную оценку эффективности исследований $K(B/I)$ ученого B , получим новую оценку соотношения эффективностей этих ученых

$$K(A/B) = K(A/I)/K(B/I), \quad (13)$$

отличающуюся от оценок этого соотношения (4), (6), (8) тем, что она является косвенной, использующей предварительно вычисленные абсолютные оценки эффективности исследований обоих ученых.

3. Метод моментов оценки библиометрических показателей

Рассмотрим теперь принципиально другой метод оценки библиометрических показателей эффективности научных исследований. Этот метод основан на использовании в качестве показателей эффективности исследований различных моментов распределений ссылок на публикации ученых. Вычисляя такие показатели, мы получаем сразу абсолютные оценки эффективности научных исследований, минуя этап сравнения эффективности исследований с единицей — эталоном. Для нахождения соотношения эффективностей исследований двух ученых A и B необходимо, согласно формуле (3), разделить вычисленный момент-показатель эффективности исследований одного ученого на такой же момент-показатель эффективности исследований другого ученого. Введем формально названные показатели эффективности научных исследований.

Пусть имеется произвольное распределение ссылок на публикации некоторого ученого в виде табл. 1. Назовем моментом порядка k этого распределения величину, определяемую следующим выражением:

$$L_k = (n_1^k + n_2^k + n_3^k + \dots + n_p^k)/p = \left(\sum_{i=1}^p n_i^k \right) / p, \quad k < 0. \quad (14)$$

Легко видеть, что момент 1-го порядка $L_1 = \left(\sum_{i=1}^p n_i \right) / p$ есть среднее арифметическое число ссылок на одну публикацию, момент 2-го порядка $L_2 = \left(\sum_{i=1}^p n_i^2 \right) / p$ есть среднее арифметическое квад-

ратов чисел ссылок на одну публикацию и т.д. Поэтому если мы найдем корень k -й степени (или $(\frac{1}{k})$ -ю степень) из момента L_k , то получим некоторый показатель эффективности научных исследований ученого, базирующийся на учете числа ссылок на его публикации. Таким образом, получается система абсолютных показателей эффективности научных исследований различных порядков k :

$$P_k = k\sqrt[k]{L_k} = k\sqrt[k]{\left(\sum_{i=1}^p n_i^k\right)/p}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

Эти показатели отличаются от показателей, введенных в разд. 2, тем, что позволяют учитывать различное влияние малого, среднего и большого числа ссылок на оценку эффективности исследований. Для адекватного учета этого влияния требуется лишь подобрать подходящее значение порядка k используемого показателя эффективности исследований. Кроме того, эти показатели являются абсолютными, т.е. дают сразу абсолютные оценки эффективности исследований, не требуя сравнения их с эталоном.

4. Некоторые примеры

Изложенную выше теорию библиометрического оценивания качества исследований проиллюстрируем примерами.

Пример 1. Распределения ссылок на публикации ученых A и B даны в табл. 3. Вычислить, основываясь на измерительном подходе (разд. 2), показатели эффективности научных исследований ученых и сравнить их.

Как видно из табл. 3, кривые распределений ссылок ученых A , B пересекаются: на участке 1 (публикации 1—3) суммарное число ссылок ученого A (эффективность ученого A) больше суммарного числа ссылок ученого B (эффективности ученого B), а на участке 2 (публикации 5—10) число ссылок ученого B больше, чем число ссылок ученого A . Таким образом, число публикаций ученого A на том участке, где эффективность ученого A больше, чем эффективности ученого B , равна $N(A) = 3$, а число публикаций ученого B на участке, где его эффективность больше эффективности ученого A , равно $N(A) = 6$. Отсюда соотношение эффективностей научных ис-

Таблица 3

| Число ссылок n_i | № публикации i | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ученого A | 2 | 5 | 7 | 8 | 9 | 11 | 14 | 18 | 23 | 30 |
| Ученого B | 1 | 3 | 5 | 8 | 11 | 15 | 20 | 26 | 33 | 42 |

следований ученых A и B , измеряемое соотношением чисел $N(A)$ и $N(B)$ по формуле (4), равно

$$K(A/B) = N(A)/N(B) = 3/6 = 0,5;$$

$$K(B/A) = N(B)/N(A) = 6/3 = 2.$$

Из данных табл. 3 также получаем, что суммарное число ссылок ученого A на участке 1, где его эффективность выше эффективности ученого B , равно $M'(A) = 14$, а суммарное число ссылок ученого B на участке 2, где его эффективность выше эффективности ученого A , равно $M'(B) = 147$. Отсюда соотношение эффективностей научных исследований ученых A и B , которое измеряется соотношением чисел $M'(A)$, $M'(B)$ по формуле (8), равно $K(A/B) = M'(A)/M'(B) = 14/147 = 0,095$; $K(B/A) = M'(B)/M'(A) = 147/14 = 10,5$. Далее, из табл. 3 видно, что суммарное число ссылок ученого A на участках, где его эффективность выше эффективности единичного ученого I с распределением ссылок согласно табл. 2, равно $M'(A) = 127$, суммарное число ссылок ученого B на таких же участках равно $M'(B) = 163$, а суммарное число ссылок ученого I равно $M'(I) = 10$. Отсюда абсолютные оценки эффективности научных исследований ученых A и B по формуле (12) равны

$$P_A \equiv K(A/I) = 127/10 = 12,7;$$

$$P_B \equiv K(B/I) = 163/10 = 16,3,$$

а соотношение абсолютных эффективностей научных исследований, проводимых этими учеными, по формуле (13)

$$K(A/B) = K(A/I)/K(B/I) = 12,7/16,3 = 0,779;$$

$$K(B/A) = K(B/I)/K(A/I) = 16,3/12,7 = 1,28.$$

Заметим, что измерение эффективности исследований ученых A и B по традиционному показателю "суммарное число ссылок" дает

$$M(A) = 127, M(B) = 164, K(A/B) = 127/164 = 0,775,$$

$$K(B/A) = 164/127 = 1,29.$$

Пример 2. Для ученых A и B , распределения ссылок которых даны в табл. 3, вычислить методом моментов абсолютные показатели эффективности научных исследований ученых и сравнить указанные показатели. Используем формулу (14) и вычислим два первых показателя эффективности P_1 и P_2 . В данном случае входящие в формулу (14) значения n_i для ученого A даются 2-й строкой табл. 3, а для ученого B — 3-й строкой табл. 3, для обоих ученых значение p равно 10. Подставляя эти величины в формулу (14), получаем значения абсолютных показателей эффективности:

$$\text{ученый } A: P_{1A} = 127/10 = 12,7, P_{2A} = \sqrt{2293} = 47,78;$$

$$\text{ученый } B: P_{1B} = 164/10 = 16,4, P_{2B} = \sqrt{4374} = 66,14.$$

Отсюда соотношения абсолютных эффективностей исследований ученых A и B по показателям P_1 и P_2 составляют

$$K_{P_1}(A/B) = P_{1A}/P_{1B} = 12,7/16,4 = 0,774,$$

$$K_{P_2}(A/B) = P_{2A}/P_{2B} = 47,78/66,14 = 0,722;$$

$$K_{P_1}(B/A) = P_{1B}/P_{1A} = 16,4/12,7 = 1,29,$$

$$K_{P_2}(B/A) = P_{2B}/P_{2A} = 66,14/47,78 = 1,38.$$

Приведенные примеры позволяют понять, что показатели эффективности научных исследований ученых в зависимости от принятой величины для измерения эффективности и подхода к определению показателя этой эффективности могут сильно различаться по своему числовому значению. Так, в этих примерах показатель $K(A/B)$ в зависимости от перечисленных выше факторов принимал следующие значения: 0,095; 0,5; 0,722; 0,774; 0,775; 0,779, показатель $K(B/A)$ принимал значения 1,28; 1,29; 1,38; 2,0; 10,5, показатель P_A — значения 12,7 и 47,78, а показатель P_B — 16,3; 16,4 и 66,14.

Заключение

Вводя в середине 2000-х годов библиометрические оценки эффективности научных исследований, правительства различных стран рассчитывали избавиться от субъективности экспертных оценок. Однако вскоре статистики доказали, что использование библиометрических оценок не исключает субъективизм в оценке научных исследований, а всего лишь заменяет один вид субъективности (экспертные оценки) другим (субъективная интерпретация смысла публикаций и ссылок на них). После этого различные библиометрические показатели подверглись индивидуальному изучению. В итоге выяснилось, что ни один из названных показателей на деле не позволяет объективно выполнить необходимые функции: оценка вклада

ученого в науку, выделение выдающихся ученых, сравнение достижений различных ученых и т.д. В настоящей работе автора показано, что любые, даже математически строго построенные библиометрические показатели, нельзя использовать в качестве основных показателей эффективности научных исследований уже хотя бы потому, что численные значения этих показателей сильно меняются при смене величины, измеряющей эффективность исследований, а также подхода к определению показателя эффективности. Сказанное не означает бесполезности библиометрических показателей. Эти показатели могут быть полезны в качестве вспомогательных для обнаружения выдающихся работ или ученых, предполагаемый высокий уровень которых далее может быть подтвержден с помощью экспертных оценок, являющихся основным методом надежного выделения таких работ (ученых).

Список литературы

1. **Evidence** Report: "The Use of Bibliometrics to Measure Research Quality in the UK Higher Education Systems // <http://bookshop.universitiesuk.ac.uk/downloads/bibliometrisc.pdf>.
2. <http://www.mathunion.org/Publications/Report/Citationstatistic>.
3. **Левин В. И.** Количественные показатели научной деятельности: нужны ли они науке и обществу // *Alma mater*. 2017. № 3.
4. **Research Excellence Framework** // www.ref.ac.uk. 2012.
5. **Полянин А. Д.** Недостатки индексов цитируемости и Хирша и использование других наукометрических показателей // *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. № 1. С. 131—144.
6. **Болотов В. А., Квелидзе-Кузнецова Н. Н., Лаптева В. В., Морозова С. А.** Индекс Хирша в российском индексе научного цитирования // *Вопросы образования*. 2014. № 1. С. 165—167.
7. **Шиповалова Л. В.** Индекс цитирования и объективность экспертов // *Высшее образование в России*. 2014. № 2. С. 119—125.
8. **Левин В. И.** Индекс Хирша и оценка вклада ученого в науку // *Alma mater*. 2016. № 4. С. 9—13.
9. **Имаев В. И.** Технологии увеличения индекса Хирша и развитие имитационной науки // *В защиту науки*. 2016. № 17.
10. **Самойлов Н. А.** О критериях оценки публикационной эффективности // *Alma mater*. 2016. № 11. С. 93—96.
11. **Эриггейн Л. Б.** Индекс цитирования как способ разрушения науки в России и мире // *Alma mater*. 2016. № 11. С. 97—101.

V. I. Levin, D. Sc., Professor,

Penza State Technological University, Penza, 440039, Russia

Modeling and Quantitative Estimation of Efficiency of Scientific Research

The essence of the bibliometric approach to modeling and evaluating scientific research is presented. The bases of the theory of bibliometric indicators are considered. The baseline data for the evaluation of these indicators are established. Two universal methods of this evaluating (measuring and the method of moments) are proposed. Some examples of calculating these estimates by these methods are given. The study showed that the calculation of bibliometric indicators is only the first stage of the assessment of research results of the process, followed by an second stage — expert evaluation.

Keywords: modeling of science, bibliometrics, publication, citation index, the efficiency of research

References

1. **Evidence** Report "The Use of Bibliometrics to Measure Research Quality in the UK Higher Education Systems // <http://bookshop.universitiesuk.ac.uk/downloads/bibliometrisc.pdf>.
2. [Http://www.mathunion.org/Publications/Report/Citationstatistic](http://www.mathunion.org/Publications/Report/Citationstatistic).
3. **Levin V. I.** Kolichestvennye pokazateli nauchnoj dejatel'nosti: nuzhny li oni nauke i obshchestvu, *Alma mater*, 2017, no. 3 (in Russian).
4. **Research** Excellence Framework. URL: www.ref.ac.uk, 2012.
5. **Poljanin A. D.** Nedostatki indeksov citiruемости i Hirsha i ispol'zovanie drugih naukometriческих pokazatelej, *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody*, 2014, no. 1, pp. 131–144 (in Russian).
6. **Bolotov V. A., Kvelidze-Kuznecova N. N., Lapteva V. V., Morozova S. A.** Indeks Hirsha v rossijskom indekse nauchnogo citirovaniya, *Voprosy obrazovaniya*, 2014, no. 1, pp. 165–167 (in Russian).
7. **Shipovalova L. V.** Indeks citirovaniya i ob#ektivnost' jekspertov, *Vyshee obrazovanie v Rossii*, 2014, no. 2, pp. 119–125 (in Russian).
8. **Levin V. I.** Indeks Hirsha i ocenka vklada uchenogo v nauku, *Alma mater*, 2016, no. 4, pp. 9–13 (in Russian).
9. **Imaev V. I.** Tehnologii uvelicheniya indeksa Hirsha i razvitie imitacionnoj nauki, *V zashhitu nauki*, 2016, no. 17 (in Russian).
10. **Samojlov N. A.** O kriterijah ocenki publikacionnoj jeffektivnosti, *Alma mater*, 2016, no. 11, pp. 93–96 (in Russian).
11. **Jershtejn L. B.** Indeks citirovaniya kak sposob razrusheniya nauki v Rossii i mire, *Alma mater*, 2016, no. 11, pp. 97–101 (in Russian).

УДК 004.051

С. А. Кряжев, руководитель проектов, e-mail: Sergey.Kryazhev@norbit.ru,
ООО НОРБИТ, ГК ЛАНИТ,

Е. В. Кузнецова, канд. экон. наук, доц., доц. каф., e-mail: Ev.Kuznetsova@hse.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

Е. Н. Макаров, руководитель проектов, e-mail: Evgeny.Makarov@norbit.ru,
ООО НОРБИТ, ГК ЛАНИТ

Управление портфелем ИТ-проектов как инструмент реализации ИТ-стратегии

Показано, что успешная реализация ИТ-стратегии возможна только на основе интеграции процессов стратегического и портфельного управления. Предложен тиражируемый подход к формированию портфеля ИТ-проектов в ходе разработки ИТ-стратегии. Определен состав критериев для выбора ИТ-платформы и оценки ИТ-проектов с использованием метода взвешенной суммы критериев. Разработан типовой профиль ИТ-проекта, используемый для оценки инициатив. Показаны возможности и преимущества применения современного программного обеспечения для бизнес-моделирования и управления портфелем проектов при разработке ИТ-стратегии и формировании портфеля ИТ-проектов. Предлагаемый подход апробирован на практике и проиллюстрирован в статье практическими примерами.

Ключевые слова: ИТ-стратегия, управление портфелем проектов, ИТ-проекты, профиль проекта, процессы формирования портфеля проектов, критерии отбора, метод взвешенной суммы критериев

Введение

В настоящее время в стандартах управления портфелями проектов (УПП) [1, 2], стандартах и библиотеках лучших практик в области управления информационными технологиями (ИТ) [3–5], научных публикациях в данных областях [6–9] декларируется необходимость интеграции процессов стратегического и портфельного управления. Однако следует констатировать, что на практике такая связь либо оказывается чисто формальной, либо вовсе отсутствует. Так, анализ 12 работ из рубрики "ИТ-стратегия" электронного журнала "Системы управления бизнес-процессами" (совместный проект Школы ИТ-менеджмента и Союза ИТ-директоров России СОДИТ [10]) за период с 2008 г. подтверждает это положение. В пяти статьях действительно констатируется необходимость формирования портфеля ИТ-проектов и управления отдельными

ИТ-проектами в контексте формирования и реализации ИТ-стратегии, однако конкретные методы интеграции портфельного и стратегического управления не затрагиваются ни в одной из них.

В статье [11] приведены материалы содержательной дискуссии ведущих специалистов в области управления ИТ на тему "Стратегия ИТ: выравниваем ИТ и бизнес". Ее участники указали на наличие большого числа субъективных факторов, влияющих на формирование ИТ-стратегии и на ход ее реализации, однако использование методов портфельного управления, нивелирующих действие этих факторов, осталось за рамками дискуссии.

В работе [12] показано, что даже в случаях, когда на предприятии в рамках ИТ-стратегии сформирован портфель проектов, в дальнейшем его корректировка проводится без актуализации других частей ИТ-стратегии, вне связи со стратегическими

целями. Однако в работе [12] не даны рекомендации по изменению такой негативной практики.

Таким образом, можно сделать вывод, что методы УПП, являющиеся действенным инструментом реализации ИТ-стратегии, пока не внедрены в практику в требуемой степени.

По мнению авторов, есть ряд причин такой ситуации.

1. Разработка бизнес-стратегии, ИТ-стратегии и непосредственное управление портфелем ИТ-проектов и отдельными ИТ-проектами осуществляются разными структурными подразделениями предприятий с привлечением внешних консультантов. Перечисленные субъекты могут недостаточно координировать свое взаимодействие.

2. В крупных консалтинговых компаниях, привлекаемых для разработки ИТ-стратегий, существуют собственные корпоративные методологии в данной области. Однако из-за относительной сложности и определенной закрытости информации эти методологии остаются внутренними инструментами консультантов, не передаются заказчику и не используются после завершения проекта по разработке ИТ-стратегии.

3. Во многих российских компаниях имеет место относительная незрелость процессов портфельного управления в целом.

В статье [13] показано, что для успешной разработки ИТ-стратегии следует определить набор требуемых предметно-ориентированных методов, позволяющих сформировать различные разделы ИТ-стратегии, и способ их комплексного применения. К таким предметно-ориентированным методам, несомненно, относятся методы УПП.

В связи с изложенным разработка подхода к формированию портфеля ИТ-проектов как составляющей части ИТ-стратегии с использованием соответствующих предметно-ориентированных методов и современных инструментов автоматизации является актуальной и практически востребованной задачей.

Принципы и этапы формирования ИТ-стратегии

На основе анализа научной литературы, библиотек лучших практик управления ИТ и практического опыта авторов можно выделить следующие базовые принципы, которые должны лежать в основе разработки ИТ-стратегии. ИТ-стратегия должна:

- согласовываться со стратегическими целями бизнеса;
- основываться на результатах анализа текущего состояния ИТ и бизнес-процессов (БП) предприятия;
- описывать целевую ИТ-архитектуру предприятия, а также состав проектов для реализации целевой ИТ-архитектуры;
- содержать оценку необходимых для ее реализации стоимости, сроков, ресурсов, организационных изменений;

- предусматривать возможность развития, изменения, эволюции.

ИТ-стратегия представляет собой совокупность документов, описывающих целевое состояние ИТ предприятия и пути его достижения, разработанных на основании бизнес-стратегии и согласованных с нею.

Обобщенно можно выделить следующие этапы разработки ИТ-стратегии.

1. Анализ и оценка текущего состояния ИТ предприятия.

2. Анализ БП, оценка текущего уровня автоматизации БП, определение потребностей и потенциала автоматизации БП.

3. Анализ стратегических целей предприятия и определение целей и задач развития ИТ.

4. Формирование принципов построения целевой архитектуры ИТ.

5. Разработка целевой архитектуры всех компонентов ИТ.

6. Формирование портфеля ИТ-проектов.

7. Определение состава мероприятий, необходимых для успешной реализации ИТ-стратегии. В число данных мероприятий входят реорганизация организационной структуры ИТ-подразделения, разработка системы мотивации ИТ-персонала, определение ключевых показателей эффективности выполнения отдельных ИТ-проектов и портфеля в целом, организация системы мониторинга их выполнения и т.п.

Как любой сложный и длительный процесс, разработка ИТ-стратегии требует использования современных инструментов автоматизации. Далее авторами на примерах будут показаны возможности применения специализированного программного обеспечения (ПО), позволяющего автоматизировать формализацию стратегии, бизнес-моделирование и формирование портфеля ИТ-проектов.

Обоснование подхода к формированию портфеля ИТ-проектов

Основной причиной того, что реализация проектов не позволяет предприятию достичь стратегических целей, является отсутствие единой, стройной и понятной системы формирования портфеля проектов. Интересный аспект потребности в такой системе описан А. Слюсаренко [11]: "Процесс разработки стратегии является крайне политизированным. Поскольку решения в области стратегии во многом субъективны, ее разработка нередко становится политическим ритуалом. Всегда есть риск поддаться на уговоры наиболее харизматичного "спонсора" потенциального ИТ-проекта вместо того, чтобы использовать объективные критерии".

Поэтому одним из ключевых факторов успеха реализации ИТ-стратегии является наличие в организации системы УПП, позволяющей решить следующие задачи:

- обеспечить соответствие проектов стратегическим целям в области ИТ;
- объективно определить наиболее приоритетные проекты в целях концентрации ресурсов для их выполнения и рационального распределения бюджета;
- сократить расходы за счет отказа от реализации неэффективных проектов.

В настоящее время существует большое число методов оценки ИТ-проектов. Предложены классификации и выполнены сравнительные оценки данных методов [14, 15]. По результатам анализа публикаций можно выделить следующие классы методов оценки ИТ-проектов: на основе финансовых показателей, качественные, комплексные, вероятностные.

По своей сути ИТ-проекты являются инвестиционными, поскольку направлены на вложение средств в целях получения дохода в будущем. Традиционно оценка инвестиционных проектов проводится на основе значений общеизвестных финансовых показателей, таких как РВР, IRR, ROI, NPV и др. Финансовые показатели просты и удобны для понимания, но имеют существенные ограничения применительно к ИТ-проектам. Эти показатели работают в парадигме, что все доходы и расходы проекта на бизнес. В то же время специфика ИТ-проектов такова, что множество эффектов от их внедрения имеет качественный характер, а расчет потенциальных доходов достаточно сложен и длителен, поэтому не всегда возможен на этапе проведения предварительной оценки проектной инициативы.

К числу методов оценки эффективности ИТ-проектов, использующих качественные оценки или комбинацию качественных и количественных критериев, относятся:

- IE (Information Economics) — информационная экономика;
- UA (Utility Analysis) — анализ "полезности";
- REJ (Rapid Economic Justification) — быстрое экономическое обоснование;
- ТЕI (Total Economic Impact) — совокупный экономический эффект;
- EVA (Economic Value Added) — добавочная экономическая ценность.

Однако многообразие существующих методов не означает, что проблема оценки ИТ-проектов в ходе формирования ИТ-портфеля решена. Это обусловлено несколькими причинами.

1. Существует большое число различных типов ИТ-проектов, которые существенно различаются по целям, используемым технологиям, масштабу, рискам. Применение отдельно взятого метода оценки может быть эффективно для одного типа проектов, но затруднительно или невозможно для другого.

2. Методы оценки ИТ-проектов, разработанные крупными консалтинговыми ИТ-компаниями, достаточно сложны в практическом применении и ориентированы на привлечение внешних консультантов, что требует серьезных затрат финансовых и временных ресурсов.

3. Метод должен позволять не только оценить эффективность отдельно взятого ИТ-проекта, но и провести приоритизацию проектов по результатам оценки.

Стандартом [2, 16] рекомендуется проводить оценку компонентов портфеля проектов, используя следующие группы критериев:

- общие бизнес-критерии;
- финансовые критерии;
- критерии, связанные с уровнем риска;
- критерии соответствия требованиям законодательства;
- критерии наличия трудовых ресурсов;
- маркетинговые критерии;
- технологические критерии.

Данный подход может быть применен для оценки ИТ-проектов, поскольку позволяет учесть их качественные и количественные характеристики и сформировать специфические наборы критериев для каждой категории ИТ-проектов.

Самым распространенным, давно известным и до сих пор чаще других используемым методом решения многокритериальных задач является метод, основанный на свертывании всех критериев в один обобщенный (интегральный) критерий, представляющий собой сумму критериев, взвешенных коэффициентами их относительной важности, или удельными весами. Этот метод называется *методом взвешенной суммы критериев* (далее — МВСК), на английском языке — *weighted sum method (WSM)*. В рамках данного метода оценка по качественным критериям проводится экспертно в терминах "лучше — хуже", "плохо — средне — хорошо — отлично" и т.п., а затем переводится в числовую форму, что позволяет рассчитать значения интегрального критерия для всех оцениваемых проектов и приоритизировать проекты по результатам оценки. Достоинства, недостатки и ограничения МВСК детально проанализированы в работе [17].

Алгоритм проведения оценки с использованием МВСК выполняется следующим образом.

1. Категоризация компонентов портфеля. Например, в рамках ИТ-портфеля крупной лизинговой компании авторами было предложено выделить следующие категории ИТ-проектов в соответствии с существующими на предприятии ключевыми областями ИТ¹:

- информационная система (ИС);

¹ Для производственных предприятий может быть выделена категория проектов "Автоматизированные системы управления технологическими процессами" (АСУТП).

- ИТ-инфраструктура;
- информационная безопасность;
- управление ИТ-услугами.

2. Выбор критериев оценки для каждой выделенной категории и определение их весовых коэффициентов.

3. Разработка множеств значений или градаций критериев ("шкал"). Результатом оценки является числовое значение в баллах. Шкалы позволяют перевести качественные и количественные оценки в баллы.

4. Проведение оценки проектов по выбранным критериям. Результатом являются значения интегрального показателя приоритетности.

5. Ранжирование потенциальных проектов на основании значения интегрального показателя приоритетности.

В работах [2, 16] выделяют процесс идентификации потенциальных компонентов портфеля. Результатом идентификации должно стать формализованное описание проекта. Применительно к ИТ-проектам данный процесс имеет существенную особенность, поскольку для подготовки такого описания необходимо предварительно обосновать выбор ИТ-платформы. Поэтому, по мнению авторов, в рамках процесса идентификации потенциальных компонентов ИТ-портфеля необходимо выделить подпроцесс выбора ИТ-платформы, что позволит:

- избежать оценки большого числа альтернатив при формировании портфеля;
- использовать специфический состав критериев для оценки альтернатив;
- привлечь к выбору ИТ-платформы узкоспециализированных экспертов.

Выбор ИТ-платформы

В табл. 1 приведен пример состава критериев для оценки ИТ-платформы при наличии альтернатив для проектов, относящихся к категории "Информационные системы". В данном случае значения весовых коэффициентов были определены экспертно.

Для соблюдения баланса между преимуществами платформы, оцененными по приведенным в табл. 1 критериям, и стоимостью платформы рекомендуется рассматривать отношение интегрального критерия F в баллах, полученного в результате оценки, к стоимости платформы S в млн руб., рассчитанной по перечисленным ниже статьям:

- стоимость лицензий на клиентское ПО;
- стоимость лицензий на серверное ПО;
- стоимость оборудования (если закупается);
- стоимость поддержки вендора (сопровождение лицензий, оборудования);
- среднерыночная стоимость поддержки интегратора.

По результатам проведенной оценки альтернатив выбирается ИТ-платформа, получившая самое высокое значение отношения F/S .

Описание проектных инициатив

Для проведения качественной оценки потенциальных или выполняющихся проектов необходимо описать все их значимые характеристики в едином формате. Наилучшим образом такую совокупность информации описывает термин "профиль проекта". Профиль ИТ-проекта должен содержать характеристики как общие для различных категорий проектов (например, цель, бюджет, риски и т.п.), так и специфические для соответствующей категории.

Таблица 1

Состав критериев для оценки ИТ-платформы

| Группа критериев | Критерии | Удельный вес критерия |
|-------------------------------|--|-----------------------|
| Технологические | • Охват стандартным функционалом системы выявленных бизнес-требований | 0,45 |
| | • Резерв функциональности, обеспечивающий возможности для изменения и развития бизнеса в течение ближайших 5 лет | 0,1 |
| | • Простота модернизации и дополнения функциональности системы под БП, отражающие специфику компании | 0,1 |
| | • Качественная документация и контекстная помощь | 0,05 |
| | • Наличие технологии обучения и учебных материалов | 0,05 |
| | • Периодичность выхода обновлений системы и документации | 0,05 |
| Соответствие законодательству | • Наличие функционала, обеспечивающего соответствие действующему законодательству | 0,25 |
| | • Скорость реакции вендора на изменения в законодательстве | 0,1 |
| Бизнес-критерии | • Распространенность программного продукта на предприятиях отрасли | 0,1 0,1 |
| Наличие трудовых ресурсов | • Наличие в штате специалистов по программному продукту | 0,2 |
| | • Доступность специалистов по программному продукту на рынке труда | 0,05 0,15 |

Для категории ИТ-проектов "ИС" такими обязательными специфическими характеристиками являются состав автоматизируемых БП и функциональные бизнес-требования в рамках этих БП. Определение состава автоматизируемых БП и функциональных бизнес-требований проводится на этапе 2 разработки ИТ-стратегии (см. выше) и позволяет провести оценку стоимостных и временных характеристик потенциального проекта с необходимым уровнем точности.

Для описания БП используются различные инструменты бизнес-моделирования. Так, авторами применяется российский программный продукт Business Studio, разработанный "ГК "Современные технологии управления" [18]. Средства Business Studio позволяют смоделировать БП и зафиксировать требования к автоматизации в разрезе соответствующих БП, отразить покрытие БП текущими ИС. К преимуществам данного ПО также относится наличие функционала, позволяющего использовать его в качестве инструмента описания стратегии и контроля достижения стратегических целей. Так, Business Studio позволяет провести формализацию стратегии, выделить и зафиксировать в стратегической карте дерево целей, разработать показатели достижения этих целей и осуществить сбор данных о фактических значениях показателей на этапе реализации стратегии. На рис. 1 приведен фрагмент схемы БП "Заключение договора на поставку", подготовленной в нотации EPC с использованием Business Studio. На схеме показана функция "Формирование договора по шаблону", требующая автоматизации.

Формальным документом, содержащим описание профиля проекта, является так называемый Паспорт проекта. Данный артефакт не упоминается в наиболее распространенных стандартах управления проектами, но широко применяется на практике. Содержание и формат Паспорта проекта унифицируются в рамках предприятия в соответствии со спецификой проектов. Для различных типов проектов могут использоваться различные форматы Паспорта проекта. До момента инициации проекта проектная инициатива формализуется в виде предварительного Паспорта проекта. Предварительные Паспорта проектов используются при проведении оценки проектных инициатив. В табл. 2 приведен формат предварительного Паспорта проекта, рекомендуемый авторами к использованию для формального описания ИТ-проектов.

После инициации проекта Паспорт проекта получает статус фактического. В шаблон фактического Паспорта проекта могут быть внесены дополнитель-

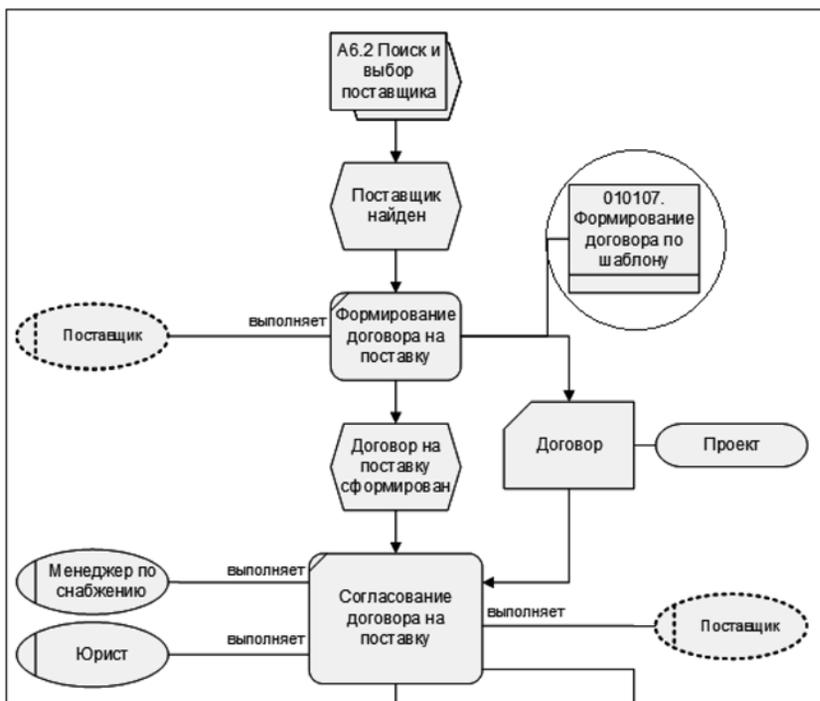


Рис. 1. Фрагмент схемы БП "Заключение договора на поставку"

ные атрибуты, например, показатели финансового инвестиционного анализа, финансовый профиль проекта, показатели эффективности проекта, контроль достижения которых должен проводиться в ходе выполнения проекта. В фактический Паспорт проекта вносятся изменения, обеспечивающие его актуальное содержание. После завершения проекта его Паспорт (все версии) в комплекте с проектной документацией передается в архив.

Оценка ИТ-проектов методом взвешенной суммы критериев

В табл. 3 приведен пример состава критериев, разработанных для оценки ИТ-проектов категории ИС крупной лизинговой компании. Удельные веса критериев были определены методом попарного сравнения. Критерии 1.2...1.6 соответствуют целям ИТ, определенным в ИТ-стратегии.

В данном примере по критерию "Бюджет проекта" наиболее высокая оценка дается среднебюджетным проектам, поскольку бюджет при условии его корректного формирования является косвенным показателем масштаба изменений по результатам проекта. Малобюджетные проекты, скорее всего, не приведут к существенным изменениям для предприятия в целом. Высокобюджетные проекты обычно являются более рискованными, не позволяют диверсифицировать портфель, уменьшая общее число проектов в портфеле, и приводят к серьезным финансовым потерям в случае неуспеха.

Результатом проведения оценки является ранжированный список ИТ-проектов. Отобранные по

Шаблон предварительного Паспорта ИТ-проекта

| Показатель | | Значение | | | | | |
|--|------|---|--|------|------|-------------|--|
| Категория проектов | | Указывается, к какой категории относится данный проект | | | | | |
| Код проекта | | | | | | | |
| Название проекта | | | | | | | |
| Цель проекта | | | | | | | |
| Соответствие стратегическим целям | | Необходимо указать конкретную цель/цели, на достижения которой направлен проект | | | | | |
| Необходимые условия для начала проекта | | Требуемая квалификация ресурсов, использование результатов других проектов и т.п. | | | | | |
| Предпосылки инициации проекта | | Описание бизнес-потребности | | | | | |
| Функциональный заказчик | | Название подразделения — функционально заказчика | | | | | |
| Выгоды от реализации проекта | | Описание возможных бизнес-выгод | | | | | |
| Организационные рамки проекта | | | | | | | |
| Автоматизируемые БП | | | | | | | |
| Функциональные бизнес-требования в рамках указанных БП | | | | | | | |
| Итоговая оценка риска проекта | | Оценка в соответствии с принятой на предприятии шкалой | | | | | |
| Профиль риска проекта | | Ссылка на файл с описанием рисков | | | | | |
| Бюджет на реализацию проекта | | | | | | | |
| Статья затрат | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | Комментарий | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| ИТОГО по статьям | | | | | | | |
| Всего по проекту | | | | | | | |
| Результат оценки проекта | | | Интегральный показатель приоритетности проекта | | | | |

Критерии оценки проектов категории ИС

| № | Описание критерия оценки | Шкала оценки | Удельный вес критерия |
|---------------------------|--|--|-----------------------|
| 1 | Общие бизнес-критерии | | 0,78 |
| 1.1 | Потенциал автоматизации в функциональной области | Очень высокий — 5 Высокий — 4 Средний — 3 Низкий — 2 Крайне незначительный — 1 | 0,19 |
| 1.2 | Способствует оптимизации организационной структуры и основных БП | Непосредственно направлен на достижение данной цели — 5 | 0,07 |
| 1.3 | Способствует снижению операционных расходов (повышению операционной эффективности) | Значительно способствует — 4 | 0,12 |
| 1.4 | Способствует повышению уровня качества лизингового портфеля | Способствует в средней степени — 3 Незначительно способствует — 2 | 0,14 |
| 1.5 | Способствует повышению эффективности управления активами | Отсутствует влияние — 1 | 0,10 |
| 1.6 | Способствует росту объемов нового бизнеса | | 0,16 |
| 2 | Финансовый критерий | | 0,1 |
| 2.1 | Бюджет проекта | До 10 млн руб. — 3 От 10 до 50 млн руб. — 5 От 50 и более млн руб. — 1 | |
| 3 | Критерии уровня риска | | 0,12 |
| 3.1 | Интегральный показатель риска проекта | Низкий — 5 Средний — 3 Высокий — 1 | |
| *Числовые данные условные | | | |

результатам оценки компоненты в совокупности образуют сценарий портфеля проектов, который подвергается анализу и балансировке. Выбранный сценарий авторизуется уполномоченным лицом или органом.

Описанная выше модель формирования портфеля ИТ-проектов была успешно реализована авторами с использованием Microsoft Project Server, который является частью полнофункционального решения в области управления проектами и портфелями проектов MS Enterprise Project Management (EPM) [19]. Помимо оценки отдельных проектов на основе МВСК данное ПО позволяет моделировать бюджетные ограничения, создавать и сравнивать между собой сценарии портфеля с учетом ограничений, выявлять недостаток трудовых ресурсов и моделировать их наем, авторизовать выбранный сценарий и контролировать ход выполнения отобранных проектов. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен анализ гипотетического сценария портфеля проектов с использованием MS Project Server.

Заключение

Разработан комплексный подход к формированию портфеля ИТ-проектов в процессе разработки ИТ-стратегии. Предложенный подход имеет следующие особенности, обладающие элементами новизны:

- в процессе идентификации потенциальных компонентов портфеля ИТ-проектов выделен подпроцесс выбора ИТ-платформы;
- предложен набор критериев для выбора ИТ-платформы из существующих альтернатив;
- определен состав характеристик, составляющих профиль ИТ-проекта, разработан шаблон описания профиля в форме Паспорта проекта;
- предложен состав критериев оценки компонентов портфеля ИТ-проектов и определены удельные веса критериев в рамках МВСК.

Подход был апробирован на практике при разработке ИТ-стратегии для крупной лизинговой компании и подтвердил свою эффективность и практическую ценность в виде следующих результатов:

- максимизирована стратегическая ценность ИТ-портфеля;
- реализован фундамент для успешного достижения целей развития ИТ на предприятии;
- обеспечено рациональное распределение бюджета портфеля;
- открыты возможности для дальнейшего развития и дополнения предложенного подхода на предприятии.

Можно также сделать вывод, что предложенный подход является достаточно универсальным и мо-

| Проекты | | | | |
|--|---------------|--------------|------------------------|----------------|
| Имя проекта | Важность ↑ | Принудитель* | Планный бюджет | Имя типа корпс |
| Выбранные проекты | 65,98% | | 37 430 000,00 Р | |
| Автоматизация системы бюджетирования | 20,69% | Авто | 7 130 000,00 Р | Корпоративный |
| Внедрение CRM системы | 20% | Авто | 3 000 000,00 Р | Корпоративный |
| Автоматизация ведения учета по МСФО | 12,64% | Авто | 9 800 000,00 Р | Корпоративный |
| Внедрение системы электронного документооборота | 7,59% | Авто | 7 000 000,00 Р | Корпоративный |
| Автоматизация подготовки управленческой отчетности | 2,76% | Авто | 3 500 000,00 Р | Корпоративный |
| Внедрение производственных модулей ERP-системы | 2,3% | Авто | 7 000 000,00 Р | Корпоративный |
| Невыбранные проекты | 34,02% | | 9 739 000,00 Р | |
| Автоматизация казначейства на базе 1С | 20,69% | Авто | 5 000 000,00 Р | Корпоративный |
| Автоматизация ведения кадрового учета | 6,9% | Авто | 239 000,00 Р | Корпоративный |
| Автоматизация управления проектами | 6,44% | Авто | 4 500 000,00 Р | Корпоративный |

Рис. 2. Анализ сценария портфеля проектов с использованием MS Project Server

жет быть использован на предприятиях различных отраслей и масштабов деятельности.

Список литературы

1. **ГОСТ Р 54870—2011.** Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов. М.: Стандартинформ, 2011. 9 с.
2. **The Standard for Portfolio Management.** 3-d ed. Philadelphia: Pennsylvania Project Management Institute, 2012.
3. **ITIL.** URL: <https://www.axelos.com/best-practice-solutions/itil>
4. **COBIT.** URL: <http://www.isaca.org/knowledge-center/cobit/Pages/Overview.aspx>
5. **ISO/IEC 38500:2008** Corporate governance of information technology (Стандарт ИСО/МЭК 38500:2008 "Корпоративное управление информационными технологиями"). URL: http://www.omniway.ua/news/ISO_IEC_38500
6. **Арчибальд Р. Д.** Взаимодействие между стратегическим управлением и управлением портфелем проектов на предприятии // Управление проектами и программами. 2010. № 04 (24). С. 266—273.
7. **Рассел Д., Арчибальд Р.** Управление высокотехнологичными программами и проектами: Пер. с англ. Мамонтова Е. В.; Под ред. Баженова А. Д., Арефьева А. О. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2010. 464 с.
8. **Грей К. Ф., Ларсон Э. У.** Управление проектами. М.: Дело и сервис, 2007. 608 с.
9. **Илларионов А. В., Клименко Э. Ю.** Портфель проектов: Инструмент стратегического управления предприятием. М.: Альпина Паблишер, 2013. 312 с.
10. **Сайт** журнала "Системы управления бизнес-процессами". URL: <http://journal.itmane.ru/rubriki>
11. **Бобровский С.** ИТ-стратегия: выравниваем ИТ и бизнес // PC Week. 2007. № 34 (592).
12. **Михайлов А.** ИТ стратегия: варианты разработки // Директор информационной службы. 2012. № 2.
13. **Чернов А. В.** Стратегия ИТ и ее связь со стратегией бизнеса // Системы управления бизнес-процессами. 2012. № 5.
14. **Красноперов К.** Оценка эффективности ИТ-Инвестиций // Открытые системы. 2003. № 6. URL: <http://www.osp.ru/os/2003/06/183146/>
15. **Кунец О.** Оценка эффективности ИТ-проектов. URL: <http://dssclub.com.ua/categories/economics/2014-03-19-09-57-47.html>
16. **Павлов А. Н.** Управление портфелями проектов на основе стандарта PMI The Standard for Portfolio Management. Изложение методологии и рекомендации по применению. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.
17. **Подиновский В. В., Потапов М. А.** Методы взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra // Бизнес-информатика. 2013. № 3 (25).
18. **Сайт** ГК "Современные технологии управления". URL: <http://www.businessstudio.ru/description/>
19. **Описание** Project Server. Библиотека TechNet компании Microsoft. URL: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/fp179724.aspx>

S. A. Kryazhev, Project Manager, e-mail: Sergey.Kryazhev@norbit.ru, NORBIT Ltd., Moscow, Russia
E. V. Kuznetsova, Associate Professor, e-mail: Ev.Kuznetsova@hse.ru,
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia
E. N. Makarov, Project Manager, e-mail: Evgeny.Makarov@norbit.ru, NORBIT Ltd., Moscow, Russia

IT-Portfolio Management as a Tool of IT Strategy Implementation

It is shown that the successful IT Strategy implementation can be fulfilled only by integration of strategic and portfolio management processes. The authors propose replicable approach to IT project portfolio defining in IT Strategy development. The list of criteria intended for IT framework choice and IT projects evaluation based on the weighted criteria sum method is defined. The generic IT project profile for initiative assessment is designed. The features and benefits of advanced business modeling and project portfolio management software tools using for IT Strategy design and portfolio defining are shown. The proposed approach is illustrated by practical examples.

Keywords: IT strategy, portfolio management, IT projects, project profile, portfolio defining processes, project evaluation criteria, weighted sum method

References

1. **GOST P 54870—2011.** *Proektnyyiy menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu portfelem proektov*, Moscow, Standartinform, 2011, 9 p. (in Russian).
2. **The Standard for Portfolio Management.** 3-d ed. Philadelphia: Pennsylvania Project Management Institute, 2012.
3. **ITIL.** Available at: <https://www.axelos.com/best-practice-solutions/itil>
4. **COBIT.** Available at: <http://www.isaca.org/knowledge-center/cobit/Pages/Overview.aspx>
5. **ISO/IEC 38500:2008** Corporate governance of information technology (Standart ISO/MEK 38500:2008 "Korporativnoe upravlenie informatsionnyimi tehnologiyami"). Available at: http://www.omniway.ua/news/ISO_IEC_38500
6. **Archibald R. D.** Vzaimodeystvie mezhdru strategicheskim upravleniem i upravleniem portfelem proektov na predpriyatii, *Upravlenie Proektami i Programmami*, 2010, no. 04 (24), pp. 266—273.
7. **Archibald R., Rassel D.** *Upravlenie vyisokotehnologichnyimi programmami i proektami*; Bazhenova A. D., Arefeva A. O. ed., Moscow, Kompaniya AyTi; DMK Press, 2010, 464 p. (in Russian).
8. **Grey K. F., Larson E. U.** *Upravlenie proektami*, Moscow, Delo i servis, 2007. 608 p.
9. **Illarionov A. V., Klimenko E. Yu.** *Portfel proektov: Instrument strategicheskogo upravleniya predpriyatiem*, Moscow, Alpina Publisher, 2013, 312 p. (in Russian).
10. **Sistemyi upravleniya biznes-protsessami.** Available at: <http://journal.itmane.ru/rubriki> (in Russian).
11. **Bobrovskiy S.** IT-strategiya: vyiravnivaem IT i biznes, *PC Week*, 2007, no. 34 (592) (in Russian).
12. **Mihaylov A.** IT strategiya: varianty razrabotki, *Direktor informatsionnoy sluzhbyi*, 2012, no. 2. (in Russian).
13. **Chernov A. V.** Strategiya IT i ee svyaz so strategiyey biznesa, *Sistemyi upravleniya biznes-protsessami*, 2012, no. 5. Available at: <http://journal.itmane.ru/node/5> (in Russian).
14. **Krasnoperov K.** Otsenka effektivnosti IT-Investitsiy, *Otkryitiye sistemyi*, 2003, no. 6. Available at: <http://www.osp.ru/os/2003/06/183146/> (in Russian).
15. **Kunets O.** *Otsenka effektivnosti IT-proektov.* Available at: <http://dssclub.com.ua/categories/economics/2014-03-19-09-57-47.html>
16. **Pavlov A. N.** *Upravlenie portfelyami proektov na osnove standartar PMI The Standard for Portfolio Management. Izlozhenie metodologii i rekomendatsii po primeneniyu*, Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. (in Russian).
17. **Podinovskiy V. V., Potapov M. A.** Metodyi vzheshennoy summyi kriteriev v analize mnogokriterialnyih resheniy: proetcontra, *Biznes — informatika*, 2013, no. 3 (25). (in Russian).
18. **Sayt GK "Sovremennyye tehnologii upravleniya".** Available at: <http://www.businessstudio.ru/description/> (in Russian).
19. **Opisanie Project Server.** Biblioteka TechNet kompanii Microsoft. Available at: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/fp179724.aspx> (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *З. В. Наумова*.

Сдано в набор 11.09.2017. Подписано в печать 20.10.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT1117. 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.