



Национальный исследовательский  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Национальный исследовательский  
КАЗАНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
им. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (ИТММ-2017)**

**МАТЕРИАЛЫ  
XVI Международной конференции  
имени А. Ф. Терпугова  
29 сентября – 3 октября 2017 г.**

**Часть 2**



ТОМСК  
«Издательство НТЛ»  
2017

УДК 519  
ББК 22.17  
И74

И74 Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017): Материалы XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (29 сентября – 3 октября 2017 г.). – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Ч. 2. – 356 с.

ISBN 978-5-89503-604-4

В часть 2 вошли материалы докладов, посвященные интеллектуальному анализу и визуализации данных, информационным технологиям и их применению, математическому и компьютерному моделированию технических и экономических систем, представленные на XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование».

УДК 519  
ББК 22.17

Редколлегия:

**А.В. Замятин**, доктор технических наук, доцент,  
**А.Н. Моисеев**, доктор физико-математических наук, доцент,  
**А.П. Кирпичников**, доктор физико-математических наук, профессор.

*Конференция проводится при поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
(проект № 17-07-20543-г)*

ISBN 978-5-89503-604-4

© Авторы. Текст, 2017  
© Оформление. Дизайн.  
ООО «Издательство НТЛ», 2017

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

## THE APPLICATION OF MODERN METHODS AND ALGORITHMS IN THE IDENTIFICATION BASED ON FACIAL LINES

*G.A. Mammadova<sup>1</sup>, M.A. Mammadova<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>National Aviation Academy of Azerbaijan*

*<sup>2</sup>British School in Baku*

### **I. Introduction**

The automatic recognition systems have widely applied in various fields due to the development of technology, specifically computers. In the modern world, it is hardly ever to find a field in which recognition system is not used. Recognition systems play a significant role in the development of economics, as well as the scientific and technical field. The systems of identification of the individual features is one of the key issues in the analysis of pictures and computer visualization.

In our daily life, we see diverse faces, but remember only some of them. We just keep in memory the facial lines of the faces that we remember based on certain features, not precisely. These features include unchanged eye color and shape of ear as well as shape of nose and lips that change over the age.

Facial recognition is based on the form of facial lines. It is determined according to the around of the eyes, the area of the cheeks, around of the mouth, shape of nose and eyes.

Facial recognition is limited with two facts.

Damage to facial lines, the ageing of them and change through plastic surgery

Lack of quality in the picture used for facial recognition

Facial recognition is very complex process. Thus, in this process unknown person's facial characteristics are searched by comparing with the facial features of people from existing source and photo-portraits of similar

faces are found. Nowadays, facial recognition systems based on photo-portraits are widely used in security systems, airports, the places where international sports events occur, usage of credit cards, forensic science.

Facial recognition which is one of the most successful applications in picture analysis and researches has been engaged attention recently. We can show at least 2 reasons for this tendency. Firstly, wide spectral commercial and law-enforcement applications, secondly, Secondary, the availability of reasonable technologies after 30 years research. Though the facial recognition software (machines) have reached their certain advanced levels in development, their successes get limited due to the particular environments (conditions) set out in many real-life applications (real practices). For instance, facial recognition based on photo-portraits is either obtained in an outdoor environment through the changes in the lighting, or there is many unsolved problems left. In other words, current systems is still remaining behind from the potential of human perception system. So, there are 2 (main goals in writing this article) purposes of the following research:

- 1) Providing modern overview to current resources.
- 2) Offering some new concept in facial recognition mechanism.

## II. Research Case

We can define the search of the photo-portrait of a given person in the database in a such way.

The subject matter is inquired in the following way.

N elements are kept in the database and it is required to find n most alike photo-portrait to the wanted person's photo. Let's first note the following points regarding to the subject matter. When we state the identification of human face from the given picture, it is considered the identification regardless of its position, direction, posture and lightening.

Let's assume, we are given the human photo-portrait with surface  $19 \times 19$  (361 pixel). The possible combination of grey values  $256^{361}$  exists. On the other hand, current world population is 6.000.000.000-approximately  $2^{32}$ . Thus, the possible numbers of such combinations are 90 times more than the world population.

Why is the identification of facial lines so difficult?

We can show following factors that leads this fact:

- The existence of structure components. Identification points should not depend on beard, mask, hair and so on.
- Identification process should not depend on the scale of photo-portrait.

- The condition of the picture: lightening (spectrum, the distribution of source, intensity), features of camera (sensor, camera lens), display facilities, frontal (on the front side), 45-degree angle, profile, upside down reverse shoot. The system of identification points should provide the relative capacity of recognition process during the shoot foreshortening (slow rotation of head, inclination, change of facial expression) during small change period.
- According to facial expressions: The facial expressions are directly affected by the appearance of it.
- The number of identification points should be as maximum as possible for the assurance of high accuracy of recognition.
- Occlusion: the face cannot be seen partially due to the effect of other objects.
- Orientation: The face seems different in different angles depending on the camera's optical axis of symmetry.

### III. Solution

Main problems related to the solution of the subject matter are following:

1) Face localization in the picture.

It includes the search of patterns of face or its distinct parts in the picture.

2) Face detection.

Two approaches exist in the recognition of facial lines:

According to 1) geometric structure of face and 2) the appearance of face.

First one – the methods based on geometric structure of face are considered as one of the initial methods. The main objectives of it consists of choosing the set of main points (or areas), then choosing the set of signs.

One of the geometric face identification methods is based on geometric distance between the main points of the face. Main points are automatically detected, however, for more precise identification choosing points manually is also possible. According to the result of first experiment, 30 identification points are detected; thus, individual's face in the picture is assumed to be symmetric (Fig. 1) and divides the face into two parts:

- $a_1$  – last lower point of chin;
- $a_2$  – lower point of lower lip;
- $a_3$  – center of mouth, merger point of lips in the face axis of symmetry;
- $a_5$  – right edge point of face in the mouth axis level;
- $a_6$  – upper point of upper lip in the face axis of symmetry;
- $a_7$  – lower tip point of nose;

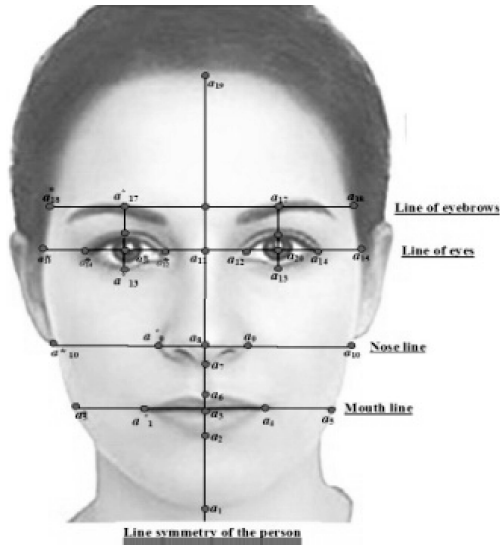


Fig. 1. Division of face into two symmetric parts

- $a_8$  – last tip point of nose (in the nose axis);
- $a_9$  – right corner point of nose in nose axis;
- $a_{10}$  – right corner point of face in nose axis;
- $a_{11}$  – the middle point of line between the org centers;
- $a_{12}$  – left corner point of right eye;
- $a_{13}$  – the central point of lower eyelid of right eye;
- $a_{14}$  – right corner point of right eye;
- $a_{15}$  – the last right point of face in the eyes axis;
- $a_{16}$  – central point of upper eyelid in the right eye;
- $a_{17}$  – central point of right eyebrow;
- $a_{18}$  – right corner point of face in eyebrow axis;
- $a_{19}$  – last upper point of forehead in the face axis of symmetry;
- $a_{20}$  – central point of right eye pupil;
- $a_4^*$  – right corner point of mouth;
- $a_5^*$  – left corner point of face in the mouth axis;
- $a_9^*$  – left corner point of nose in the nose axis;
- $a_{10}^*$  – left corner point of face in the nose axis;
- $a_{12}^*$  – right corner point of left eye;
- $a_{14}^*$  – left corner point of left eye;

- $a_{15}^*$  – left corner point of face in eyes axis;
- $a_{17}^*$  – central point of face in eyes axis;
- $a_{18}^*$  – left corner point of face in eyebrow axis;
- $a_{20}^*$  – central point of left eye pupil.
- Face axis of symmetry – the line that divides face into two symmetric parts.
- Mouth axis – line that crosses center of mouth as well as being perpendicular to the face axis of symmetry.
- Nose axis – line that crosses the nose tip by being perpendicular to the face axis of symmetry.
- Eyes axis – line that crosses the centre of eye pupils.
- Eyebrow axis – line that crosses points  $a_{17}$  and  $a_{17}^*$ .

Furthermore, there are 2 subparts of methods based on the appearance of the face.

Based on 1) local and 2) global characteristics

Technologies based on local characteristics: DCT (Discrete Cosine Transform) – It is detraction of voice or image. MP3s and JPEGs. It is obtained by splitting the image or voice in different frequencies. In this research, we shall use 2 global holistic algorithm PCA (Principal Component Analysis) and LDA (Linear Discriminant Analysis)

The analysis of principal components:

Principal components method (Principal Component Analysis) consist of orthogonal linear transformation of  $N$ -dimensional  $X$  entry vector to  $M < N$ -dimensional  $Y$  output vector.

Facial recognition with the application of Principal Component Analysis is as following:

### I Step

Input vectors are centeralized face pictures in unit scale ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_m$ ). Each picture turns into  $N$ -dimensional vector and is located in one cluster. Each of these pictures is  $n \times n$ -sized. For example,  $50 \times 50$ . So all these pictures are  $n^2$  sized, 2500 pixel.



Fig. 2. Set of  $M$  pictures

Pictures turn into vectors

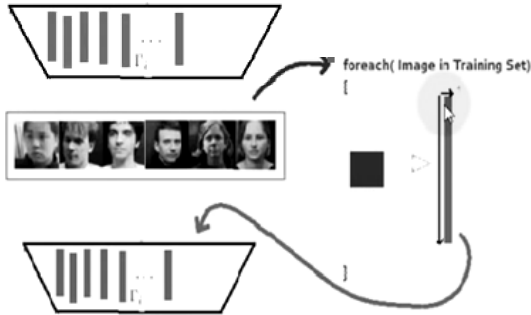


Fig. 3. Space of face vectors

Clearly, all these vectors consist of purple column as in the image.

### II Step

Now let's normalize these vectors.

The normalization of vectors is basically removing general characteristics from vectors which have it, only keeping the general features for each vector.

Thus, in order to normalize the vectors, firstly we have to remove general characteristics. Let's take a look at the search of general characteristics for the given pictures.

Let's denote the middle of face vectors with  $\psi$ .

It is signed by green column in the Fig. 4.

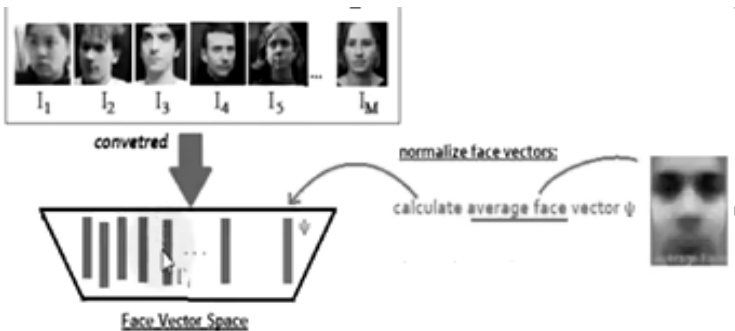


Fig. 4. The middle of face vectors



Thus, if  $\psi$  is the image that denotes middle vector, thus image keeps the characteristics of all mutual characteristics of images above, and matches to arbitrary one of the above.

Consequently, if we subtract the middle vector from each vector, we obtain the normalized image vector.

$$\Phi_i = \eta_i - \psi.$$

So normalized image vectors are denoted by blue columns in the Fig. 5.

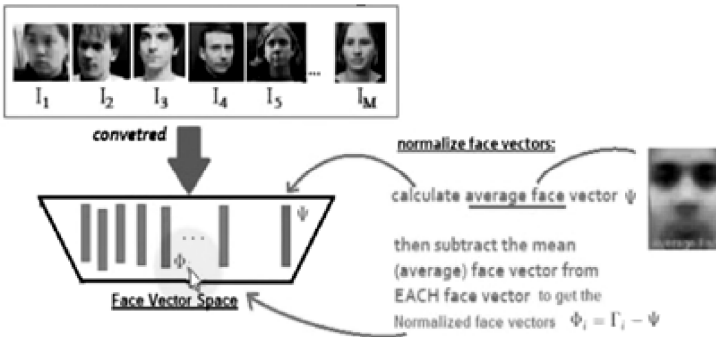


Fig. 5. Normalized image vector

### III Step

We have to find covariance  $c$  matrix in order to find Eigen vectors. Overall PCA algorithm is retrieved by the decomposition of covariance matrix.

$$C = A * A^T.$$

Here it gets values from  $A \{ \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n \}$  cluster.  $\Phi_i$ -s are normalized vectors.

Let's take a look at the dimension of matrix  $C$ .

Obviously, Vector  $A$  is  $N^2 \times M$ -dimensional. Meanwhile we can calculate the dimension of matrix  $C$  in the following way.

$$\begin{array}{ccc}
 & C = A * A^T & \\
 \swarrow & & \searrow \\
 N^2 \times M & & M \times N^2
 \end{array}$$

Thus, matrix  $C$  will be  $N^2 \times N^2$ -dimensional. Clearly, the dimension of matrix  $C$  is too big.

Let's assume that  $50 \times 50$  sized images are given. Apparently, in this case matrix  $C$  will be  $N^2 \times N^2 = 2500 \times 2500$ . As a result, matrix  $C$  will create 2500 eigen vectors. The key point is to find the vector with highest eigenvalue within these vectors.

#### IV Step

Let's take a look at the choice of eigen vectors, eigenvalues and principal component in matrix  $C$ . In this step, eigen vectors  $u_i$  and eigen values  $\gamma_i$  respectively.

$M'$  eigen vector ( $u$ ) from given  $M$  eigen vector should be chosen that it has the highest eigenvalue.

The highest eigen values coincide with the images (eigen vectors) who have more specific characteristics. As eigen vectors with lower eigen values suits only small parts of specific characteristics of face, they are removed. This process continues till  $M'$  eigen vector and  $\gamma_i$  eigenvalues are retrieved.

#### Conclusion

Thus, facial recognition is one of the most significant research fields in processing of digital image for Human Computer Interface-HCI. Automatization of different processes plays an important role in the solution of security issues. These processes requires specific softwares that recognizes the pictures of human faces. Facial recognition technology based on photo-portrait is such a calculation tool that according to the given image facial recognition and location of human are detected.

At first, facial recognition technologies were only based on frontal recognition of face. However, recently developed technologies with invariant features enables the detection of face in all forms of image, structural objects, as well as the facial expressions.

#### REFERENCES

1. *Biometrik texnologiyalar* [Mətn] / R.M. Əliquliyev, Y.N. İmamverdiyev, V.Y. Musesayev; elmi red. R.M. Əliquliyev. – AMEA, İnformasiya Texnologiyaları İn-tu, 2010.
2. *Kazimov T.H., Mahmudova Sh.J.* The role of biometric technology in ensuring information safety // The second Republican Conference on the scientific-practical multidisciplinary problems of Information security, Baku, Azerbaijan, 14.05.2015. – P. 218–221.
3. *Kazimov T.H., Mahmudova Sh.J.* About a Method Recognition of Race and Ethnicity of Individuals Based on Portrait Photographs // Intelligent Control and Automation. – 2014. – V. 5. – No. 3. – P. 120–125.

4. *Divyarajsinh N. Parmar et al.* // Int. J. Computer Technology & Applications. Face recognition methods & applications. – V. 4(1). – P. 84–86
5. *Hemant Makwana & Taranpreet Singh.* Comparison of different algorithm for face recognition // Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Vision. – 2013. – V. 13. – Iss. 9. – Version 1.0.
6. *Yi-Shin Liu Wai-Seng Ng Chun-Wei Liuş.* A Comparison of Different Face Recognition Algorithms.
7. *Zhao W., Chellappa R., Phillips P.J. & Rosenfeld A.* Face recognitions literature survey // ACM Computing Surveys. – 2003. – V. 35. – No. 4, December. – P. 399–458.
1. *Heisele B., Ho P., Wu J., Poggio T.* Face recognition: Component-based versus global approaches // Comput. Vis. Image Understand. – 2003. – V. 91. – No. 1. – P. 6–12.
9. *S. Asadi, Dr. D. V. Subba R., V. Saikrishna.* Comparative study of Face Recognition with PCA and Cross-Correlation Technique // IJCA(0975-8887). – 2010. – V. 10. – No. 8, November.
10. *Suhas S., Kurhe A., Khanale Dr.P.* Face Recognition Using Principal Component Analysis and Linear Discriminant Analysis on Holistic Approach in Facial Images Database // IOSR Journal of Engineering e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719. – 2012. – V. 2. – Iss. 12 (Dec.) ||V4||. – P. 15–23.

# **СЕРВЕР ИСТОРИИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА БАЗЕ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

***А.С. Алдохин<sup>1</sup>, А.В. Замятин<sup>1</sup>, Е.А. Телицын<sup>2</sup>,  
В.Н. Тренькаев<sup>1</sup>, В.Д. Яновский<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*  
<sup>2</sup>*АО «ЭлеСи», г. Томск, Россия*

В настоящее время в различных отраслях промышленности (транспорт нефти и газа, добыча полезных ископаемых, энергетика) востребованы системы автоматизированного управления технологическими процессами, в том числе системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA-системы), которые позволяют в реальном времени собирать, обрабатывать и отражать значения параметров технологических процессов.

Одним из важных сервисов SCADA-системы является сбор и предоставление технологической информации в виде временных рядов. При этом требуется осуществлять сбор данных в режиме реального времени и без потерь. Как показывает практика [1, 2], применение в данном случае традиционных реляционных баз данных не всегда оправдано и часто дает низкую производительность. Более эффективным представляется использование специализированных баз данных реального времени.

В данной работе рассмотрен рабочий прототип СУБД на базе свободного программного обеспечения, разработанный с учетом использования в системах промышленной автоматизации.

## **1. Архитектура Сервера истории**

При проектировании специализированной СУБД для SCADA-систем (далее – Сервер истории) учитывались следующие факторы:

- источник и хранилище технологических данных разнесены;
- технологические данные генерируются очень быстро;
- объем технологических данных постоянно увеличивается;
- обрабатываются технологические данные с временными метками;
- требуется поддержка OPC UA-интерфейсов [3].

Предлагаемая архитектура Сервера истории приведена на рис. 1 и включает три компонента: Коллектор, Сервер исторических данных, Конфигуратор.



Рис. 1. Архитектура Сервера истории

С помощью Конфигуратора определяются технологические параметры, значения которых требуется собирать. Непосредственно за получение технологических данных отвечает Коллектор, который располагается вблизи от Источников данных. Важная задача Коллектора – буферизация данных в случае отсутствия связи с Сервером исторических данных.

Коллектор в качестве клиента по спецификации OPC UA подключается к Источникам данных, собирает и передает технологические данные Серверу исторических данных, где они записываются в хранилище (БД истории). После истечения установленного срока данные первичного вида архивируются, т.е. попадают в хранилище архивных данных (Архив).

В свою очередь Сервер исторических данных предоставляет клиентским приложениям по спецификации OPC UA или SQL-интерфейсу данные за запрошенный интервал времени как из БД истории, так и из Архива.

Как на Коллекторе, так и на Сервере исторических данных ведется журнал, содержащий диагностические сообщения о ходе работы компонента, а также ведется сбор статистической информации.

## **2. Выбор механизма хранения данных**

Важной особенностью Сервера исторических данных является наличие в его архитектуре механизма хранения данных (движка БД), который предоставляет низкоуровневый интерфейс доступа к данным. Таким образом, производительность Сервера истории существенно зависит от производительности механизма хранения данных.

Поскольку технологические данные могут быть представлены как временные ряды, то в качестве движка БД предлагается использовать либо СУБД временных рядов, либо хранилище ключ-значение.

На данный момент существует достаточно много решений [4, 5], в том числе распространяемых на условиях свободного лицензионного договора, как среди СУБД временных рядов, так и среди хранилищ ключ-значение. Однако в нашем случае движок БД должен удовлетворять целому ряду критериев:

- ориентация на хранение данных на HDD-дисках;
- высокая скорость операции записи;
- свободное программное обеспечение с возможностью использовать в коммерческой разработке;
- стабильность разработки (много релизов, проект живет);
- встраиваемое решение (подключаемая библиотека на C/C++).

В результате сравнительного анализа существующих решений на базе вышеприведенных критериев, а также с учетом результатов тестирования [6–10] выявлены следующие кандидаты среди хранилищ ключ-значение: LevelDB [11], HyperLevelDB [12], Sophia [13], BangDB [14]. Стоит отметить, что среди СУБД временных рядов не найдено свободных решений, удовлетворяющих нашим требованиям.

Чтобы оценить возможность использования выявленных кандидатов в качестве движка БД в Сервере истории, проведено нагрузочное тестирование каждого кандидата в типовом окружении. Кроме выбранных

NoSQL-кандидатов как альтернатива оценивался реляционный движок SQLite [15].

На базе стандартной рабочей станции был развернут тестовый стенд, реализованный на языке программирования C++ с использованием инструментария для разработки ПО Qt, включающий генератор тестовых данных, урощенный вариант Коллектора и Сервера исторических данных с возможностью подключения произвольного движка БД.

Характеристики рабочей станции следующие: процессор Intel Core i7-6700 CPU @ 3,40 ГГц × 8, объем оперативной памяти 8 Гбайт, жесткий диск – 1ТВ 7200 RPM 32MB Cache, операционная система – Ubuntu 16,04 LTS, файловая система – ext4.

Оценивалась скорость операции записи при модели технологических данных (далее – сигналов), построенной на основе OPC UA-спецификации. Каждый сигнал имеет следующие атрибуты (поля): идентификатор сигнала, значение сигнала, время изменения сигнала, качество сигнала. При этом в качестве ключа хранилища ключ-значение используется пара <идентификатор сигнала, время изменения сигнала>, а в качестве значения – пара <значение сигнала, качество сигнала>.

Тестирование осуществлялось по следующему сценарию. Тестовые сигналы, поступающие от генератора, принимаются Коллектором и далее передаются и закладываются в буфер движка на Сервере исторических данных. После подготовки сигналов (требуется адаптация данных к использованию интерфейса конкретного движка БД) происходит последовательная (случайная) запись сигналов в БД одиночными сигналами или большими порциями по одному миллиону сигналов. После проведения нескольких экспериментов вычислялись средние значения производительности в метрике количество тысяч сигналов в секунду.

#### Результаты тестирования

Вид записи	LevelDB	Hyper LevelDB	BangDB	Sophia	SQLite
Последовательная одиночными сигналами	372	388	300	65	51
Случайная одиночными сигналами	70	218	191	47	52
Последовательная пакетами сигналов	862	676	–	92	129
Случайная пакетами сигналов	440	323	–	48	138

В таблице приведены результаты тестирования, из которых видно, что наибольшую скорость последовательной записи (862000 сиг./с) показало хранилище LevelDB. Отметим, что именно последовательная запись актуальна при обработке временных рядов, когда технологические данные упорядочены по времени. Тем самым Сервер истории, если в качестве движка БД использовать LevelDB, сможет обслуживать порядка десятков тысяч сигналов с частотой обновления значений 100 мс. Данный показатель соответствует существующей практике использования SCADA-систем.

Кроме того, для выявления узких мест в предложенной архитектуре по схожему сценарию проведено нагрузочное тестирование некоторых базовых операций Сервера истории:

- сериализация сигналов и запись в оперативный буфер Коллектора;
- передача сигналов по сети и запись в буфер движка БД;
- десериализация сигналов и подготовка к записи в БД;
- запись сигналов в БД, когда в качестве движка БД используется LevelDB.

Выявлено, что самая медленная операция Сервера истории среди вышеперечисленных – операция записи сигналов в БД.

### **Заключение**

В данной работе приведены результаты исследования архитектуры Сервера истории для систем управления технологическими процессами на базе свободного программного обеспечения, когда в составе Сервера истории имеется механизм хранения данных (движок БД), который предоставляет низкоуровневый интерфейс доступа к данным.

Проведенное нагрузочное тестирование отдельных модулей рабочего прототипа Сервера истории показало, что узким местом данной архитектуры является движок БД. Произведен сравнительный анализ и тестирование существующих открытых решений, которые можно использовать в качестве движка БД в Сервере истории. Наибольшую скорость последовательной записи показало хранилище ключ-значение LevelDB. Скорость операции записи оценивалась с помощью модели технологических данных, построенной на основе OPC UA-спецификации.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что Сервер истории в предложенной архитектуре позволит обеспечить необходимые для современных SCADA-систем характеристики.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Д.А., Шмидт И.А. Разработка системы управления архивными данными испытаний газотурбинных установок большой мощности // Современные проблемы науки и образования (электронный научный журнал). – 2014. – № 2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12035> (дата обращения: 28.04.2017).
2. Москвитин Д.В. InfinityHistoryServer 3.0 История в деталях // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – № 10. – С. 31–36.
3. Богданов Н., Киселева О. OPC Unified Architecture: изменения в популярной технологии информационных обменов с точки зрения инженера // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 3. – С. 82–87.
4. Best key-value stores [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2crowd.com/categories/key-value-stores> (дата обращения: 28.04.2017).
5. Top 10 time series databases [Электронный ресурс]. – URL: <http://blog.outlyer.com/top10-open-source-time-series-databases> (дата обращения: 28.04.2017).
6. LevelDB benchmarks [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lmdb.tech/bench/microbench/benchmark.html> (дата обращения: 28.04.2017).
7. Benchmarking LevelDB vs. RocksDB vs. HyperLevelDB vs. LMDB performance for InfluxDB [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.influxdata.com/benchmarking-leveldb-vs-rocksdb-vs-hyperleveldb-vs-lmdb-performance-for-influxdb/> (дата обращения: 28.04.2017).
8. Performance data for LevelDB, Berkley DB and BangDB for random operations [Электронный ресурс]. – URL: <http://highscalability.com/blog/2012/11/29/performance-data-for-leveldb-berkley-db-and-bangdb-for-rando.html> (дата обращения: 28.04.2017).
9. HyperLevelDB performance benchmarks [Электронный ресурс]. – URL: <http://hyperdex.org/performance/leveldb/> (дата обращения: 28.04.2017).
10. BangDB vs LevelDB – performance comparison [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.iqllect.com/blog/2016/07/12/bangdb-vs-leveldb-performance-comparison/> (дата обращения: 28.04.2017).
11. LevelDB [Электронный ресурс]. – URL: <http://leveldb.org/> (дата обращения: 28.04.2017).
12. HyperLevelDB [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/rescrv/HyperLevelDB> (дата обращения: 28.04.2017).
13. Sophia [Электронный ресурс]. – URL: <http://sophia.systems/> (дата обращения: 28.04.2017).
14. BangDB [Электронный ресурс]. – URL: <http://bangdb.com/> (дата обращения: 28.04.2017).
15. SQLite [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sqlite.org/> (дата обращения: 28.04.2017).

# КЛАССИФИКАЦИЯ ИММУНОСИГНАТУРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ОПАСНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

*В.С. Андриященко, Е.Ю. Перец, И.Е. Лялюхова*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Сегодня распространенность онкологических, инфекционных и других заболеваний сохраняется на достаточно высоком уровне [1]. При этом профилактика и диагностика таких заболеваний до сих пор остается достаточно дорогостоящей и длительной процедурой, но при этом не лишенной неточностей. Например, традиционная диагностика позволяет распознавать онкологические заболевания на сравнительно поздних сроках [2]. Ранняя диагностика дает возможность выявлять заболевания до наступления критического момента. Поэтому многие научно-исследовательские коллективы и отдельные ученые в мире активно занимаются поиском новых более совершенных методов и систем диагностики заболеваний. При этом эти методы и системы, как правило, требуют значительных по объему дополнительных исследований (инвазивных, травматических и т.п.) [2] и в основном ориентированы на экспертный визуальный анализ результатов [3]. При этом в диагностических задачах используются не только методы анализа данных, полученных различными традиционными способами (томография, флюорография и т.п.) [4, 5], но и набирает популярность сравнительно новый метод анализа иммуносигнатур [6].

Суть этого метода в том, что применяется медицинский тест, использующий массив из случайных пептидных последовательностей, имитирующих эпитопы антигенов, для связывания с антителами [3]. Именно эти данные могут помочь в постановке окончательного диагноза. На сегодняшний день существует несколько видов пептидных матриц – это малая и большая матрицы, содержащие около 10000 и 330000 тысяч пептидов соответственно [7]. В таком случае возникает проблема анализа и интерпретации данных. Даже опытному специалисту будет очень непросто поставить диагноз, анализируя значения матрицы с тысячами различных пептидов [8]. Возможным решением этой проблемы

может быть классификация данных. Сегодня существует большое количество классификаторов, которые могут быть опробованы для решения данной проблемы [9, 10]. Кроме того, стоит рассмотреть нейросетевые методы классификации, которые очень хорошо себя показали при работе с медицинскими данными [11, 12]. Таким образом, целесообразно рассмотреть следующие классификаторы, основанные на разном математическом аппарате:

**Линейный классификатор** – метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM). Один из самых часто используемых алгоритмов обучения с учителем, использующийся для задач классификации и регрессионного анализа. Из-за своей универсальности имеет широкое применение в медицине, финансах, задачах распознавания образов и т.д. [13]. Основное преимущество метода SVM – это скорость нахождения решающих функций и относительная простота реализации алгоритма, к недостаткам можно отнести то, что SVM чувствителен к шумам и стандартизации данных.

Вероятностный классификатор – Наивный Байес (Naive Bayes classifier, NB) – простой вероятностный классификатор, основанный на теореме Байеса со строгими (наивными) предположениями о независимости между функциями [14]. Основное достоинство NB – это простота реализации и низкие вычислительные затраты при обучении. Недостаток – низкое качество классификации на реальных задачах.

**Ансамбль классификаторов** – Случайный лес (Random Forest, RF) – алгоритм машинного обучения, предложенный Лео Брейманом и Адель Катлер, заключающийся в использовании комитета (ансамбля) решающих деревьев [15]. Главная идея алгоритма заключается в том, что берется относительно слабый алгоритм, в данном случае дерево принятий решений. Строится множество разных моделей с участием этого алгоритма, далее результат предсказаний каждой модели усредняется и выбирается лучшее решение. Главное преимущество RF – это способность эффективно обрабатывать данные с большим числом признаков и классов. Недостатком является большой размер получаемых моделей. Требуется  $O(N)$  памяти для хранения модели.

**Искусственная нейронная сеть** – Многослойный перцептрон (Multilayer Perceptron, MLP). Так называют нейронные сети прямого распространения. Входной сигнал в таких сетях распространяется в прямом направлении, от слоя к слою [16]. Многослойный перцептрон в

общем представлении состоит из следующих элементов: множества входных узлов, которые образуют входной слой, одного или нескольких скрытых слоев вычислительных нейронов, одного выходного слоя нейронов. Преимуществами персептрона является возможность алгоритмически неразрешимых задач и простота реализации. Однако при увеличении сложности задачи растет и число нейронов.

**Ассоциативная память** – Нейронная сеть Хэмминга (Hamming Neural Network, HN). Искусственная нейронная сеть Хэмминга используется для решения задач классификации бинарных входных векторов. В основе ее работы лежат процедуры, направленные на выбор в качестве решения задачи классификации одного из эталонных образов, наиболее близкого к поданному на вход сети зашумленному входному образу, и отнесение данного образа к соответствующему классу. Для оценки меры близости к каждому классу используется критерий, учитывающий расстояние Хэмминга – количество различающихся переменных у зашумленного и эталонного входных образов [17]. Преимуществами данного классификатора являются небольшой объем сети и предельная простота. При всем этом сеть способна работать только с бинарными входными сигналами.

### Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является анализ методов классификации применительно к иммуносигнатурным данным. Необходимо обучить каждый классификатор, оценить точность классификации, время обучение и распознавания. Также для каждого алгоритма необходимо подобрать оптимальные параметры, которые будут подходить как для этих данных, так и для похожих случаев. Итогом данного исследования будет рекомендация к использованию классификатора или ансамбля классификаторов.

Пусть матрица  $\mathbf{X}$  – множество значений светимостей пептидов,  $\mathbf{Y}$  – множество классов диагнозов:

$\mathbf{X} = \{x_{i,j}\}$ , где  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , где  $m$  – количество строк,  $n$  – количество столбцов.

$\mathbf{Y} = \{y_k\}$ ,  $k = \overline{1, z}$ , где  $z$  – количество классов.

Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный вектор светимостей  $\mathbf{X}_i$  с классом  $y_k$ .

В данной работе будет использован иммуносигнатурный пептидный микрочип высокого разрешения [13]. Оцифрованные данные получены из публичного хранилища биомедицинских данных [18]. Всего отображено 240 экземпляров, из которых 120 известных объектов с размеченными классами были выбраны для обучения и 120 неразмеченных – для тестирования. Каждая выборка разделена на 6 классов по 20 объектов для каждого класса.

### Описание методов

#### Метод опорных векторов

Точки имеют следующий вид:  $\{(\mathbf{X}_1, y_1), (\mathbf{X}_2, y_2), \dots, (\mathbf{X}_m, y_k)\}$ .

Гиперплоскости представлены как  $w \cdot \mathbf{X}_i - b = \pm 1$ , где  $\mathbf{w}$  – нормальный вектор. Задача состоит в том, чтобы минимизировать  $\|\mathbf{w}\|$ . Запишем задачу оптимизации:

$$\begin{cases} \arg \min_{w, b} \|\mathbf{w}\|^2 \\ y_k (w * \mathbf{X}_i - b) \geq 1, 1 \leq i \leq m, \end{cases}$$

которая решается задачей квадратичного программирования.

#### Наивный байесовский классификатор

Байесовский классификатор использует оценку апостериорного максимума (Maximum a posteriori estimation) для определения наиболее вероятного класса. Учитывая, что знаменатель является константой, запишем уравнение в виде

$$y_{\text{map}} = \arg \max_{y_j \in Y} [P(\mathbf{X}_i | y_j) P(y_j)].$$

#### Случайный лес

Случайный лес представляется в виде ансамбля  $N$  деревьев:  $\{T_1(\mathbf{X}), T_2(\mathbf{X}), \dots, T_N(\mathbf{X})\}$ , где  $T_i$  – дерево решений. Ансамбль возвращает  $N$  предсказаний:  $\{y_1 = T_1(\mathbf{X}), \dots, y_N = T_N(\mathbf{X})\}$ , где  $y_i$  – возвращаемый класс. Далее из  $y_i$  выбирается самый часто встречаемый класс.

### Многослойный персептрон

Выход каждого нейрона вычисляется по формуле

$$Output = \text{th}\left(\frac{G}{\alpha}\right), \quad G = \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot w_i,$$

где  $x_{ij}$  – входное значение нейрона;  $w_i$  – весовой коэффициент.

### Нейронная сеть Хэмминга

Для расчёта состояний нейронов первого слоя используется формула

$$S_{1j} = \sum_{i=1}^M w_{ij} \cdot x_{ij} + T, \quad T = \frac{M}{2},$$

где  $w_{ij}$  – весовой коэффициент  $i$ -го входа  $j$ -го нейрона;  $x_i$  – входное значение. Выходам нейронов второго слоя в качестве начального значения присваиваются значения выходов нейронов первого слоя. Для расчета состояния нейронов второго слоя на каждой итерации используется формула

$$S_{2j}^{(q+1)} = y_{2j}^{(q)} - \varepsilon \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^K y_{2p}^{(q)}, \quad \varepsilon \in \left(0, \frac{1}{K}\right].$$

### Экспериментальные исследования

Исходная выборка содержит в себе «сырые» данные, а для корректной работы классификаторов данные необходимо нормировать, поэтому проведена нормировка данных с помощью медианного метода [9].

Следующий шаг – это выделение наиболее информативных признаков. Наша выборка содержит 10420 пептидов, а для успешной классификации необходимо максимально уменьшить количество признаков в признаковом пространстве. Для этой отдельной задачи используются различные статистические методы и алгоритмы отбора наиболее информативных признаков [19]. В данном исследовании был использован  $t$ -критерий Стьюдента [20]. В результате для каждого класса болезней было отобрано 24 самых информативных пептида. В конечном итоге данные для классификации, где  $n = 120$  количество пептидов в каждом векторе, количество векторов  $m = 120$ , а также  $z = 6$  различных классов.

Фрагмент исследований представлен на рис. 1. Проанализировав полученные результаты, следует сделать вывод, что для классификации иммуносигнатурных данных применимы различные алгоритмы, все эти методики показывают достаточно высокий уровень точности. Стоит отметить, что при использовании бинарной классификации (каждая болезнь сравнивается отдельно с контрольным классом) точность для каждого классификатора близка к 100 %, что дает возможность обучения отдельных классификаторов для определения необходимой болезни.

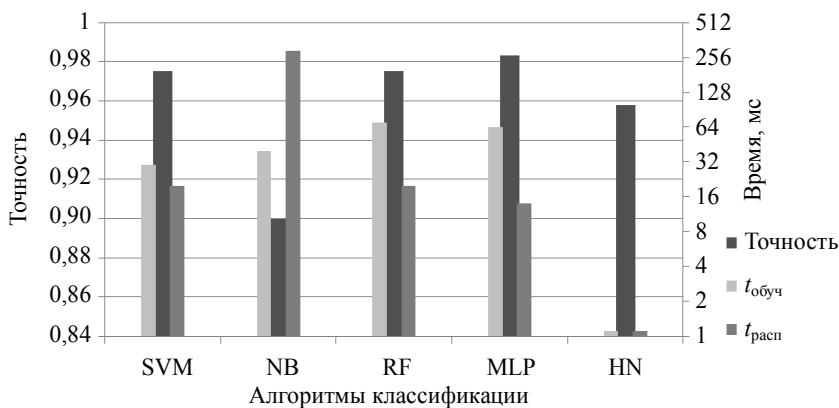


Рис. 1. График точности методов классификации

### Заключение

В результате проведенных исследований протестированы пять различных классификаторов. Оценивая результаты, следует дать следующие рекомендации. Для достижения максимальной точности стоит использовать метод опорных векторов или многослойный перцептрон – данные классификаторы показали наивысшую точность. Для достижения максимального быстродействия оптимальна Нейронная сеть Хэмминга, показавшая наименьшее время обучения и распознавания. Классификатор Случайный лес показал приемлемое время работы и точность, однако данный алгоритм стоит использовать с осторожностью: точность классификации варьируется при каждом обучении. Аутсайдером в данном случае оказался классификатор Наивный Байес, показавший наихудшие результаты. Это объясняется тем, что при наличии шума у данного классификатора понижается точность.

На сегодняшний день существуют и другие пептидные матрицы, состоящие из 110000, 125000 и более 330 тысяч пептидов. Предполагается, что рассмотренные алгоритмы будут успешно работать и с матрицами более высокой размерности. Планируется рассмотреть и другие способы и методы классификации, а также использовать ансамбль классификаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *World Cancer Report 2014*. International Agency for Research on Cancer. World Health Organization. 2014
2. *Ntagirabiri R., Munezero B., Nizigiyimana*. Assessment of diagnostic efficiency of the optic upper digestive endoscopy in the era of video endoscopy // *Journal African d&#39; Hepato-Gastroenterologie*. – 2015.
3. *Wang X., Song X., Chapman B.E., Zheng B.* Improving performance of computer-aided detection of pulmonary embolisms by incorporating a new pulmonary vascular-tree segmentation algorithm // *SPIE Medical Imaging*. – 2012.
4. *Park S.Y., Sargent D., Spofford I., Vosburgh K.G., A-Rahim Y.* A colon video analysis framework for polyp detection // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2012.
5. *Park S.C., Chapman B.E., Zheng B.* A multistage approach to improve performance of computer-aided detection of pulmonary embolisms depicted on CT images: Preliminary investigation // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2014.
6. *Brian O'Donnell1, Alexander Maurer1, Antonia Papandreou-Suppappola and Phillip Stafford*. Time-Frequency Analysis of Peptide Microarray Data: Application to Brain Cancer Immunosignatures.
7. *Josh Richer, Stephen Albert Johnston, and Phillip Stafford*. Epitope Identification from Fixed-complexity Random-sequence Peptide Microarrays. – 2015.
8. *Kukreja M., Johnston S.A., Stafford P.* Immunosignaturing microarrays distinguish antibody profiles of related pancreatic diseases // *Proteomics and Bioinformatics*. – 2012.
9. *Phillip Stafford, Zbigniew Cichacz, Neal W. Woodbury, and Stephen Albert*. Immunosignature system for diagnosis of cancer. – 2014.
10. *Sahajpreet Singh & Phillip Stafford & Karen A. Schlauch, & Richard R.* Humoral Immunity Profiling of Subjects with Myalgic Encephalomyelitis Using a Random Peptide Microarray Differentiates Cases from Controls with High Specificity and Sensitivity. – 2016.
11. *Cyberlenika* – Научная электронная библиотека [Электронный ресурс]. – URL: <http://cyberlenika.ru/article/n/set-hemminga-i-ee-primenenie-dlya-resheniya-zadachi-raspoznavaniya-podpisey> (дата обращения: 16.05.2017).
12. *Derong Liu, Huaguang Zhang, Marios Polycarpou, Haibo He*. Advances in Neural Network. – 2011.
13. *Nello Cristianini, John Shawe-Taylor*. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. – Cambridge University Press, 2000.
14. *Rish, Irina*. An empirical study of the naive Bayes classifier // *IJCAI 2001 Workshop on Empirical Methods in Artificial Intelligence*. – 2001.



- 
15. *Breiman L.* Machine Learning. – 2001.
  1. *AIPORTAL* – портал искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/multi-perceptron.html> (дата обращения: 16.05.2017).
  17. *Портал* искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – URL: <http://neuronus.com/theory/971-nejronnye-seti-khemminga.html> (дата обращения: 16.05.2017).
  18. *Публичная база данных* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата обращения: 16.05.2017).
  19. *Лялюхова И.Е., Андрющенко В.С., Перец Е.Ю.* Задача информативности по данным пептидных микрочипов. – 2017.
  20. *Richard Mankiewicz.* The Story of Mathematics (Paperback ed.). – Princeton, NJ: Princeton University Press, 2004.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ПО АЛЬТЕРНАТИВНЫМ СЦЕНАРИЯМ

*А.А. Афанасьев, А.В. Замятин*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Моделирование изменений ландшафтного покрова предполагает нахождение прогнозной карты на момент времени  $t_3$  в будущем на основе выявленных тенденций изменений по двум картам на моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . Проведение моделирования позволяет получить результат, дающий представление о том, как изменится рассматриваемый участок территории в случае сохранения тенденций предыдущего периода времени. В случае, если есть основания полагать, что тенденция изменится или есть потребность рассмотреть другие возможные варианты прогнозных карт при изменении тенденций, то имеет смысл проведение моделирования по альтернативным сценариям [1, 2].

Под альтернативным сценарием будем понимать процесс моделирования изменений ландшафтного покрова, в результате которого полученная прогнозная карта будет значительно и предсказуемо отличаться от прогнозной карты, полученной стандартным путём, то есть с предположением о сохранении текущих тенденций изменений. Под значительным изменением будем понимать изменение, которое не могло возникнуть только вследствие стохастической природы процесса. Под предсказуемостью будем понимать условие заведомой информации о том, доля какого ландшафтного класса (ЛК) в конечном изображении должна уменьшиться, а какого – увеличиться.

## **Описание алгоритма моделирования**

Стохастические модели часто основаны на использовании аппарата клеточных автоматов (КА) и марковских цепей, позволяющих на базе разновременных тематических карт  $\mathbf{I}^{t_1}$  и  $\mathbf{I}^{t_2}$  на моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , матрицы  $\mathbf{M}_\Phi = [m_{ij}^\Phi] = f_\Phi(\mathbf{I}^{t_2}, \mathbf{I}^{t_1})$  фактического числа переходов элементов на отрезке времени  $\Delta t_2 \in [t_2; t_1]$  из типа (класса)  $\omega_i$  в тип  $\omega_j$ ,

матрицы вероятностей переходов  $\mathbf{P} = [p_{ij}] = f_P(\mathbf{M}_\phi)$  и матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}} = [m_{ij}^{\text{ож}}] = f_{\text{ож}}(\mathbf{M}_\phi, \mathbf{P})$  ожидаемого числа переходов элементов на отрезке  $\Delta t \in [t_1; t_2]$  построить прогнозную тематическую карту  $\mathbf{I}^{t_3}$  на некоторый момент времени  $t_3$  в будущем [3–9]. Идея моделирования заключается в осуществлении всех переходов между классами изображения  $\mathbf{I}^{t_2}$ , определёнными в матрице  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  с вероятностями, определёнными в матрице  $\mathbf{P}$ . Стоит заметить, что на практике для расчета вероятностей переходов также учитываются расположение конкретного элемента изображения  $\mathbf{I}^{t_2}$ , а также, по возможности, некоторые дополнительные данные.

### Сценарии моделирования

Для осуществления альтернативного сценария моделирования необходимо внести изменения в исходные данные или процедуру моделирования. Тенденции изменения, в рамках которых будет осуществлено моделирование, определяются матрицами  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  и  $\mathbf{P}$ . Изменения могут быть внесены в обе матрицы [1]. Однако в матрице  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  задаётся конкретное количество всех трансформаций и по её параметрам легко определить все отличия альтернативного сценария от стандартного. При этом новую матрицу  $\mathbf{P}$  можно получить из матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ .

### Процедура модификации матрицы ожидаемых переходов

**Постановка задачи.** Имеется матрица ожидаемых переходов  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  размером  $N \times N$ , где  $N$  – число классов ландшафта. Требуется найти матрицу  $\mathbf{M}'_{\text{ож}}$ , модифицированную, согласно некоторым условиям, в рамках конкретного альтернативного сценария моделирования.

Исходными данными в данной задаче также являются параметры модификации. Параметры модификация могут задаваться в зависимости от нужд исследователя и лиц, заинтересованных в исследовании. Наиболее простой, базовый вариант – задать относительное изменение долей классов в прогнозной карте относительно основного сценария.

В рамках данного подхода задаются только относительные изменения количества ячеек каждого класса в итоговой прогнозной карте. Данное условие задаётся с помощью вектора коэффициентов общих из-

менений  $\mathbf{G}$ ,  $g_i \in [0, \infty)$ . В более усложненном подходе задаётся также матрица локальных разрешений  $\mathbf{L}$ ,  $l_{ij} \in \{0; \infty\}$ , определяющая разрешения изменений элементов матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ . Такая матрица определяет, за счет каких конкретно элементов  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  следует провести модификацию матрицы, а также повышающие и понижающие коэффициенты. В частном случае  $l_{ij} \in \{0; 1\}$  матрица  $\mathbf{L}$  определяет только разрешения или запрет на изменение отдельных элементов матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ . В случае  $\forall l_{ij} = 1$  задача сводится к первому случаю, в котором задан только вектор  $\mathbf{G}$ .

В результате модификации матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  получаем матрицу  $\mathbf{M}'_{\text{ож}}$ , для которой должны выполняться следующие условия:

$$\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} = g_j \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad j = 1, \dots, N; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} = \sum_{j=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Условие (1) следует из определения вектора  $\mathbf{G}$ . Условие (2) вытекает из того, что суммы элементов строк матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  отражают количество ячеек соответствующих классов на исходной карте для моделирования. Изменение сумм строк противоречит смыслу данной матрицы.

Будет полезным определить условия, которые позволят оценить выполнимость модификации заранее. В случае если задан только вектор  $\mathbf{G}$ , условия корректности модификации можно записать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^N (g_j m_{ij} - m_{ij}) = 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N \left( g_j \sum_{i=1}^N m_{ij} \right) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N m_{ij}. \quad (4)$$

Условие (3) следует из условия (2) и отражает необходимость сохранения сумм строк матрицы. Условие (4) отражает необходимость сохранения общей суммы матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ .

Если задана также матрица  $\mathbf{L}$ , то в этом случае применимо условие (4). Условие (3) необходимо модифицировать. Поскольку в случае, если задана матрица  $\mathbf{L}$ , нельзя модифицировать матрицу  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  умножением каждого элемента на соответствующий элемент вектора  $\mathbf{G}$ , то определим скорректированный вектор  $\mathbf{G}^c$  из следующего выражения:

$$\left( l_{ij} > 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} l_{ij} g_j^c \right) + \left( l_{ij} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} \right) = g_j \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad j = 1, \dots, N; \quad (5)$$

$$g_j^c = \frac{g_j \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} - \left( l_{ij} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} \right)}{\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} l_{ij}}, \quad j = 1, \dots, N; \quad (6)$$

Теперь условие корректности будет записано как

$$\sum_{j=1}^N \left( l_{ij} > 0 \rightarrow g_j^c l_{ij} m_{ij}^{\text{ож}} - m_{ij}^{\text{ож}} \right) = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7)$$

Условие (7) аналогично по смыслу выражению (3).

### Алгоритм расчета элементов $M'_{\text{ож}}$ с учетом обязательных ограничений и условий

На практике довольно сложно подобрать  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{L}$ , которые будут обеспечивать выполнение условий трансформации и при этом сохранять корректность матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ , поэтому предлагается рассмотреть алгоритм модификации матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$ , который обеспечивает, прежде всего, сохранение корректности этой матрицы. Представленный ниже алгоритм уменьшает соответствующие ячейки матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  и только затем увеличивает те ячейки, что должны быть увеличены, но только в той мере, насколько это обеспечивает выполнение вышеуказанных ограничений. Таким образом, матрица  $\mathbf{M}'_{\text{ож}}$  соответствует условиям

$$\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} = g_j \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad j = 1, \dots, N, \quad g_j < 1; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} > \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad j = 1, \dots, N, \quad g_j > 1. \quad (9)$$

Таким образом, данный алгоритм обеспечивает выполнение условий уменьшения конкретных классов, но не гарантирует выполнение условий увеличения. В случае, если матрица  $\mathbf{L}$  не задана, считаем что  $\forall l_{ij} = 1$ .

**Условия модификации будут записаны следующим образом:**

$$\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} = \left( l_{ij} > 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} l_{ij} g_j^c \right) + \left( l_{ij} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}} \right), \quad j = 1, \dots, N, \quad g_j < 1,$$

$$\sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} \geq \sum_{i=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad j = 1, \dots, N, \quad g_j > 1.$$

### Описание алгоритма

ШАГ 1. Корректируем значения элементов матрицы  $\mathbf{M}_{\text{ож}}$  для того, чтобы изменить суммы столбцов, которые нужно уменьшить. В этом случае учитываем матрицу  $\mathbf{L}$  и скорректированные значения  $g_j^c$ :

$$m_{ij}^{\text{ож}'} = \begin{cases} m_{ij}^{\text{ож}} l_{ij} g_j^c, & \text{если } l_{ij} > 0, g_j < 1, \\ m_{ij}^{\text{ож}}, & \text{если } l_{ij} = 0, \end{cases} \quad j = 1, \dots, N, \quad i = 1, \dots, N.$$

ШАГ 2. Корректируем значения элементов матрицы  $\mathbf{M}'_{\text{ож}}$  для того, чтобы восстановить суммы строк.

Вычисляем значения, на которые должны увеличиться соответствующие элементы матрицы ( $d_{ij}$ ). Рассчитываем поправочный коэффициент ( $c_i$ ). Корректируем матрицу значений и прибавляем к матрице  $\mathbf{M}'_{\text{ож}}$ :

$$d_i = \sum_{j=1}^N m_{ij}^{\text{ож}'} - \sum_{j=1}^N m_{ij}^{\text{ож}}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$d_{ij} = (g_j^c m_{ij}^{\text{ож}'} - m_{ij}^{\text{ож}'}) l_{ij}, \quad \text{если } g_j^c > 1, l_{ij} > 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, N,$$

$$c_i = d_i / \sum_{j=1}^N d_{ij},$$

$$d'_{ij} = d_{ij} c_i l_{ij}, \quad l_{ij} > 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, N,$$

$$m_{ij}^{\text{ож}''} = m_{ij}^{\text{ож}'} + d'_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, N.$$

### Пример применения

Приведем пример применения описанного выше подхода для решения прикладной задачи прогнозирования изменений ландшафтного покрова территории Португалии, реализованной в рамках международного исследовательского проекта LANDYN при поддержке Португальского научного фонда. Для исследования использованы тематические карты территории Португалии, соответствующие состоянию территории за 1990 и 2006 года. Ландшафтно-классовая структура исследуемой территории представлена укрупненным набором из 15 ландшафтных классов.



Из результатов, приведенных в табл. 2, видно, что все классы, площадь которых на прогнозной карте должна быть уменьшена, уменьшились на заданную величину. Те классы, площадь которых должна быть увеличена, были увеличены на величину меньше заданной, как и ожидалось.

Таблица 2

**Результат модификации матрицы ожидаемых переходов**

ЛК	Число элементов класса в прогнозной карте	Число элементов класса в альтернативной прогнозной карте	Разница	Разница в долях	G
1	73395	76145	2750	1,04	1,05
2	27014	28938	1924	1,07	1,10
3	3894	3696	-198	0,95	0,95
4	811	830	19	1,02	1,05
5	30553	27493	-3060	0,90	0,90
6	13839	14258	419	1,03	1,05
7	1876	1876	0	1,00	1,00
8	61842	58749	-3093	0,95	0,95
9	35418	35418	0	1,00	1,00
10	29443	30672	1229	1,04	1,10
11	221	221	0	1,00	1,00
12	55	55	0	1,00	1,00
13	4947	4947	0	1,00	1,00
14	1311	1321	10	1,01	1,05
15	16938	16938	0	1,00	1,05
Все	301557	301557	0	1	-

**Вывод**

Рассмотрение альтернативных сценариев моделирования может быть полезным для комплексного исследования развития территории. Реализация альтернативного сценария может быть осуществлена путём внесения изменений в матрицу ожидаемых переходов. При внесении изменений необходимо помнить о сохранении корректности матрицы. Условия сохранения корректности матрицы ожидаемых переходов могут противоречить параметрам её изменения, поэтому подбор таких параметров является сложной задачей. В качестве подхода к модификации матрицы ожидаемых переходов предлагается алгоритм, ставящий в приоритет уменьшение площади поверхности указанных классов. Предложенный алгоритм опробован на реальной задаче моделирования территории Португалии.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Coppedge B.R., Engle D.M., and Fuhlendorf S.D.* Markov models of land cover dynamics in a southern Great Plains grassland region // *Landsc. Ecol.* – 2007. – V. 22. – No. 9. – P. 1383–1393.
2. *Zamyatin A.V., Afanasyev A.A., and Cabral P.* Approach to the analysis of land cover dynamics using change detection and spatial stochastic modeling // *Optoelectron. Instrum. Data Process.* Springer. – 2015. – V. 51. – No. 4. – P. 354–363.
3. *Menzel L. et al.* Modelling the effects of land-use and land-cover change on water availability in the Jordan River region // *Adv. Geosci.* – 2009. – V. 21. – P. 73–80.
4. *Muller M.R. and Middleton J.* A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada // *Landsc. Ecol.* – 1994. – V. 9. – No. 2. – P. 151–157.
5. *Cabral P. and Zamyatin A.* Markov Processes in Modeling Land Use and Land Cover Changes in Sintra-Cascais, Portugal // *Dyna.* – 2009. – V. 76. – No. 158. – P. 191–198.
6. *Iacono M. and Levinson D.* A Markov chain model of land use change in the Twin Cities, 1958–2005 // *Proceeding 10th Int. Symp. Spat. Accuracy Assess. Nat. Resour. Environ. Sci.* – 2012. – No. 514. – P. 1–24.
7. *Yang X., Zheng X.-Q., and Lv L.-N.* A spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata // *Ecol. Modell.* – 2012. – V. 233. – P. 11–19.
8. *Arsanjani J.J., Kainz W., and Mousivand A.J.* Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov Chain based on cellular automata: the case of Tehran // *Int. J. Image Data Fusion.* – 2011. – V. 2. – No. 4. – P. 329–345.
9. *Shafizadeh Moghadam H. and Helbich M.* Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model // *Appl. Geogr.* – 2013. – P. 40. – P. 140–149.

# КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОДЕКА ДЛЯ СЖАТИЯ ВИДЕОДАНЫХ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

*Д.В. Дружинин, А.В. Замятин*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В последние годы создание и применение видео стало доступно широкому кругу пользователей. Один из основных типов видео, распространённых среди пользователей персональных компьютеров (ПК), – видео графического интерфейса пользователя (Graphical User Interface видео, GUI-видео). Такое видео часто создают как необходимое дополнение к руководству пользователя информационно-программных комплексов или к описанию сценариев воспроизведения ошибок при взаимодействии команд разработчиков и инженеров по качеству программного обеспечения для повышения эффективности их коммуникации. Кроме того, GUI-видео создаётся рядовыми пользователями в режиме демонстрации собственного экрана компьютера с графическим интерфейсом собеседнику посредством телекоммуникационного программного обеспечения (Skype, Google Hangouts и др.).

Ввиду значительного объёма видеоданных (данных, получаемых в ходе формирования видео) возникают сложности, связанные с необходимостью отводить большое количество дискового пространства и каналы связи высокой пропускной способности для их хранения и передачи. Как следствие, появляется задача минимизации как суммарного объёма передаваемых или хранимых видеоданных, так и *битрейта* (максимального количества передаваемых данных между узлами в сети за единицу времени). Дополнительно эта задача осложняется тем, что GUI-видеоданные характеризуются высоким разрешением.

Кроме того, приложения, осуществляющие фиксацию GUI-видео, выполняют лишь вспомогательную функцию, работают в фоновом режиме и выполняются вместе с другими приложениями и сервисами операционной системы. Поэтому необходимо минимизировать уровень использования ими системных ресурсов компьютера, требуемых для эффективного исполнения основных задач пользователя. Как следствие,

появляется нетривиальная задача повышения вычислительной эффективности алгоритмов фиксации и сжатия GUI-видеоданных при максимальной ресурсоэффективности. Под ресурсоэффективностью будем понимать уровень использования центрального процессора (ЦП) и оперативной памяти (ОП).

GUI-видео существенно отличается от традиционного видео, что в значительной мере ограничивает возможности применения к GUI-видеоданным традиционных алгоритмов сжатия, таких, как в [1–5]. Так, в GUI-видеоданных преобладают дискретно-тоновые (резкие) цветовые переходы. Такие видеоданные, как правило, целесообразно сжимать без потерь информации специализированными алгоритмами, так как даже небольшой процент потерь может привести к неприемлемому визуальному ухудшению качества видеоданных.

Проблема создания эффективных алгоритмов и программного обеспечения (ПО) сжатия GUI-видеоданных всё ещё остаётся малоизученной.

В статье сформулированы требования к ПО кодека для сжатия GUI-видеоданных и предложены концептуальные основы создания такого ПО, упрощающие создание аналогичных систем.

## **1. Требования к программному обеспечению кодека**

Существуют базовые требования, выдвигаемые практически ко всем кодекам для сжатия видеоданных. Это в первую очередь возможность кодировать и декодировать кадры, возможность произвольного доступа к кадрам в закодированном массиве данных. Рассмотрим требования к кодекам для сжатия GUI-видеоданных (далее – кодеков).

1. Кодек должен осуществлять высокопроизводительную обработку данных, чтобы сжимать GUI-видеоданные, которые, как правило, характеризуются высоким разрешением кадров, в оперативном режиме.

2. Кодек должен обладать высокой ресурсоэффективностью, то есть иметь низкий уровень использования ЦП и ОП. Это позволит кодеку функционировать в фоновом режиме, не влияя на другие приложения и сервисы операционной системы.

3. Кодек должен осуществлять сжатие без потерь информации, так как даже небольшой процент потерь может привести к значительному визуальному ухудшению качества GUI-видеоданных [6, с. 120]. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы входные данные кодека были сформированы из снимков экрана, сохранённых с исходным разрешением.

4. Для упрощения встраивания кодека в различные программные комплексы он должен предоставлять функциональный и объектный интерфейс. Функциональный интерфейс позволяет использовать кодек в приложениях, написанных на языках, ориентированных на процедурное программирование (например, С). Объектный интерфейс предназначен для использования в приложениях, написанных на объектно-ориентированных языках.

## 2. Концептуальные основы создания программного обеспечения кодека

Учитывая вышеизложенные требования, предъявляемые к кодеку сжатия GUI-видеоданных, определим общие принципы его построения. Обобщённая структура ПО кодека, иллюстрирующая применение таких принципов, представлена на рис. 1. Блоки с белым фоном соответствуют внешним по отношению к разработанному ПО кодека подсистемам, блоки с серым фоном – подсистемам, входящим в состав кодека.

1. Язык программирования, выбранный для реализации кодека, должен обеспечивать высокую гибкость при работе с ОП. Такой принцип выбора языка программирования направлен на соответствие первому требованию к ПО кодека.

2. В целях уменьшения нагрузки на ЦП отдельные этапы обработки данных, хорошо поддающиеся распараллеливанию, должны быть перенесены на видеокарту. Использование вычислительных ресурсов видеокарты направлено на удовлетворение второму требованию к ПО кодека. Вместе с тем кодек должен оставаться полностью функциональным, если аппаратная платформа не оснащена видеокартой или видеокарта не поддерживает технологии GPGPU. В этом случае все этапы обработки данных должны выполняться на ЦП. Поэтому на рис. 1 к *Подсистеме обработки данных с помощью видеокарты* ведёт пунктирная линия.

3. Ввиду того, что алгоритмы сжатия ключевых и промежуточных кадров существенно отличаются [1, 6], целесообразно обособить подсистемы, выполняющие их обработку. Поэтому предлагается создать в рамках Кодера *Подсистему сжатия ключевых кадров* и *Подсистему сжатия промежуточных кадров*, а в рамках декодера *Подсистему декодирования ключевых кадров* и *Подсистему декодирования промежуточных кадров*.



Рис. 1. Обобщённая структура ПО кодека

Подсистема хранения данных предназначена для сохранения и чтения закодированных данных, поиска кадров в закодированном массиве данных. В качестве *Хранилища данных* может выступать файловая система или база данных.

### 3. Структура программного обеспечения кодека

#### Butterfly Screen Video Codec

Авторами разработан кодек Butterfly Screen Video Codec, соответствующий описанным выше требованиям. Обратимся к структуре ПО этого кодека (рис. 2). Блоки с белым фоном соответствуют внешним по отношению к разработанному ПО кодека подсистемам, блоки с серым фоном – подсистемам, входящим в состав кодека.

Структура ПО разработанного кодека соответствует обобщённой структуре кодека для сжатия GUI-видеоданных, представленной выше.

**Подсистема обработки данных с помощью видеокарты.** Эта подсистема предназначена для выполнения отдельных этапов сжатия на видеокarte, что позволяет высвободить ресурсы ЦП для других задач. Подсистема подключается в ходе работы кодера, только если аппаратная платформа оснащена видеокartой, поддерживающей технологию



Рис. 2. Структура ПО кодека

NVidia CUDA, поэтому на рис. 2 к этой подсистеме ведёт пунктирная линия.

**Подсистема хранения данных.** Данная подсистема предназначена для сохранения, чтения закодированных данных, поиска кадров по номеру. В качестве основного хранилища данных используется файл, содержащий закодированные видеоданные. Подсистема поддерживает также чтение и запись отдельных кадров в ОП.

**Подсистемы сжатия и декодирования ключевых кадров.** Данные подсистемы предназначены для обработки ключевых кадров. Содержат соответственно реализацию кодера и декодера, входящих в состав двух-этапного комбинированного алгоритма сжатия [7] соответственно. Подсистема использует подсистему *Библиотека базовых классов для сжатия данных (zlib)* для обработки данных на втором этапе комбинированного алгоритма.

**Подсистема сжатия промежуточных кадров.** Данная подсистема координирует работу *Модуля отсечения неизменившихся частей кадра* и *Модуля оценки движения*. Модуль отсечения неизменившихся частей кадра реализует адаптивный алгоритм отсечения неизменившихся областей в кадре [8]. Модуль оценки движения реализует алгоритм оценки движения с учётом классификационных признаков [9]. Эта подсистема использует *Подсистему обработки данных с помощью видеокарты* для выполнения отсечения неизменившихся частей кадра на видеокarte.

**Подсистема декодирования промежуточных кадров.** Данная подсистема координирует работу *Модуля восстановления неизменившихся частей кадра* и *Модуля компенсации движения*. Эти модули реализуют декодеры, соответствующие реализациям алгоритмов сжатия, содержащихся в описанных выше модулях *Подсистемы сжатия промежуточных кадров*.

### Заключение

Сформулированы требования к ПО кодека для сжатия GUI-видео-данных. Такой кодек должен осуществлять высокопроизводительное сжатие данных без потерь, обладать высокой ресурсоэффективностью, предоставлять функциональный и объектный интерфейс. Предложены концептуальные основы создания ПО кодека для сжатия GUI-видео-данных, включающие обобщённую структуру ПО такого кодека и упрощающие создание аналогичных систем. Предложена структура ПО кодека Butterfly Screen Video Codec, отвечающая этим требованиям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ватолин Д. и др.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 384 с.
2. *Agha S. and Dwyer V.M.* Algorithms and VLSI Architectures for MPEG-4 Motion Estimation [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lboro.ac.uk/departments/el/research/esc-miniconference/papers/agma.pdf>
3. *Morvan Y., Farin D., and P.H.N. de With.* Incorporating depth-image based view-prediction into h.264 for multiview-image coding. [Электронный ресурс]. – URL: <http://vca.ele.tue.nl/publications/data/Morvan2007d.pdf>
4. *Movement estimation system for video signals using arecursive gradient method.* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.freepatentsonline.com/4695882.html>
5. *Pieters B., Van Rijsselbergen D., and De Neve W.* Motion Compensation and Reconstruction of H.264/AVC-coded Pictures using the GPU [Электронный ресурс]. – URL: [http://symposium.elis.ugent.be/archive/symp2006/papers\\_poster/paper084\\_Bart\\_Pieters.pdf](http://symposium.elis.ugent.be/archive/symp2006/papers_poster/paper084_Bart_Pieters.pdf)

6. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука: пер. с англ. В.В. Чепыжова. – М.: Техносфера, 2006. – 365 с. – (Мир программирования).
7. *Дружинин Д.В.* Комбинированный алгоритм сжатия ключевых кадров экранного видео // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 3(16). – С. 67–77.
8. *Дружинин Д.В., Замятин А.В.* Адаптивный алгоритм сжатия видеоданных графического интерфейса пользователя // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016): материалы XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (12 – 16 сентября 2016 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – Ч. 2. – С. 96–102.
9. *Дружинин Д.В.* Алгоритм оценки движения, адаптированный для обработки экранного видео // Вычислительные методы и программирование: Научный журнал. – М.: Научно-исследовательский вычислительный центр при МГУ, 2009. – С. 117–122.



## ПОСТРОЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЧЕТОВ ДЛЯ SCADA-СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*А.В. Замятин<sup>1</sup>, В.В. Андреева<sup>1</sup>, С.В. Чернышов<sup>1</sup>, Е.А. Телицин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup>*АО «ЭлеСи», г. Томск, Россия*

Управление производством сопровождается постоянным сбором, обработкой и хранением производственных и технологических данных, требующих информационного сопровождения и тщательного документирования производственных и технологических процессов. Такая задача решается с помощью систем промышленной отчетности, либо, другими словами, с помощью систем генерации отчетов (СГО). Анализируя функциональность различных СГО [1–6], можно выделить общие функции, характеризующие такие системы и обеспечивающие решение всех основных задач по обработке, хранению и анализу данных, возникающих в системах промышленной отчетности. К таким функциям относятся:

- *Сбор данных* с различных источников: OPC-серверы, HMI/SCADA-системы, системы управления базами данных (СУБД).

- *Архивирование* как мгновенных, так и вычисляемых системой данных во встроенных или внешних СУБД.

- *Вычисление и анализ данных* выполняется функциональными компонентами, обеспечивающими математическую и статическую обработку и поддерживаемыми системой генерации отчетов.

- *Конфигурирование и дизайн отчетов* реализуется путем создания шаблонов отчетов, содержащих различные функциональные объекты, такие, как текстовые надписи, рисунки, дата и время, тренды, таблицы, диаграммы и гистограммы.

- *Генерирование и доставка отчетов.* Система промышленной отчетности поддерживает публикацию отчетов в следующих форматах: pdf-файл; xls-файл; html-страницы (просмотр в веб-браузерах). Система генерации отчетов выполняет генерацию экземпляров отчетов на основе разработанных шаблонов: в зависимости от различных параметров по расписанию (периодические), по событиям (формируются автоматиче-

ски на основе заданных разработчиком правил), по требованию (вручную, запускаются оператором). Основные способы доставки экземпляров отчетов: сохранение на файл-сервере, распечатка, рассылка по email, публикация на веб-портале.

Таким образом, этот набор функций можно рассматривать в качестве основных требований к современному функционалу СГО, допускающему переход как на современные технологии, так и на разработку эффективных алгоритмов обработки и визуализации данных.

В данной работе в качестве основных средств для реализации предложенных решений будем использовать свободное программное обеспечение (СПО), ориентированное на ведение разработки. Выбор в пользу СПО связан со многими аспектами, а именно с дешевизной, безопасностью, адаптируемостью СПО за счет модификации функционала под нужды различных задач [7–10].

В нашем случае предлагается решение по системе генерации отчетов на базе СПО, обеспечивающего реализацию *всех основных функций* для систем генерации отчетов, не уступающему проприетарному программному обеспечению (ПО) ни по богатству функционала, ни по производительности.

### Система генерации отчетов

Одной из главных задач СГО – визуализация данных, формирование выходных отчетных форм представления данных. Одним из совершенных подходов, который наиболее применим в современных системах, является подход, представленный в работе [11], обеспечивающий такие возможности, как автоматизированное формирование отчетов, сохранение структуры формы отчета и алгоритмов подготовки исходных данных для них, независимость форм представления отчетов от изменения данных.

Формирование отчетов при таком подходе основывается на взаимодействии *специального программного обеспечения*, содержащего алгоритм построения отчета; *информационного обеспечения*, которое хранит информацию, необходимую для построения отчетов, шаблоны отчетов и шаблоны фрагментов. Здесь предполагается, что специальное программное обеспечение не подвергается какому-либо изменению, за исключением информационного обеспечения, в которое, с целью обеспечения гибкости, вносятся *правила, описывающие построения* отчета. Одним из недостатков предложенного решения является то, что экземп-

ляры шаблоны документов, фрагменты шаблонов ориентированы на графические редакторы под управлением ОС Windows, что является неприемлемым в нашей работе.

Принимая во внимание описанные возможности подхода из [11], в нашей работе предлагается расширить информационную составляющую системы за счет введения уровня бизнес-представления и уровня источников данных. Таким образом, формирование отчета разделяется на два уровня [2]: уровень бизнес-представления и уровень источников данных.

На уровне бизнес-представления (рис. 1) определяются бизнес-объекты, описывающие определенную предметную область, где каждый объект представляет собой множество атрибутов определенного типа. Формированием бизнес-представлений занимаются специалисты, обладающие знанием в рассматриваемой предметной области, оперирующие ее терминами и структурами, при этом не рассматривая варианты источников хранения информации. Далее с помощью редактора шаблонов создается структура шаблона, полностью базируясь на бизнес-объектах, созданных ранее. Структура шаблона создается с помощью специального программного средства (графического редактора), в котором определены графические элементы отчета (варианты таблиц, надписей, диаграмм, возможность настройки листа), допускающие индивидуальную настройку, а также назначение правил обработки данных. Такой подход делает создание шаблона отчета независимым от внешних редакторов. Обработка данных для шаблона отчета и его элементов определяется специализированным языком RDL (Report Definition Language), который допускает применение формул для вычисления значений, а также позволяет определить параметры шаблона и внешний вид отчета. Язык RDL является декларативным языком, который позволяет избежать разработки процедур, циклических конструкций. В язык внесены специальные конструкции, позволяющие очень просто строить отчеты с динамической разверткой, не прибегая к серьезному программированию.

Уровень источников данных (рис. 1) определяется такими объектами, как *источники*, состоящие из набора подключений к физическим источникам, и *представление источника данных*, содержащего необходимое количество источников, каждому из которых пользователем формируется *модель объектов данных*. Модель объектов данных представления источников описывает схему источников данных, состоящую из атрибутов определенного типа. Выделяются следующие типы объек-

тов: *таблица, представление, отношение* (между таблицами и представлениями), *запрос, скрипт*. Каждый из этих объектов, помимо того что обладает своим набором свойств, характеризуется общими свойства – набором столбцов (атрибутов), которым соответствуют реальные данные из источника связанного с объектом.

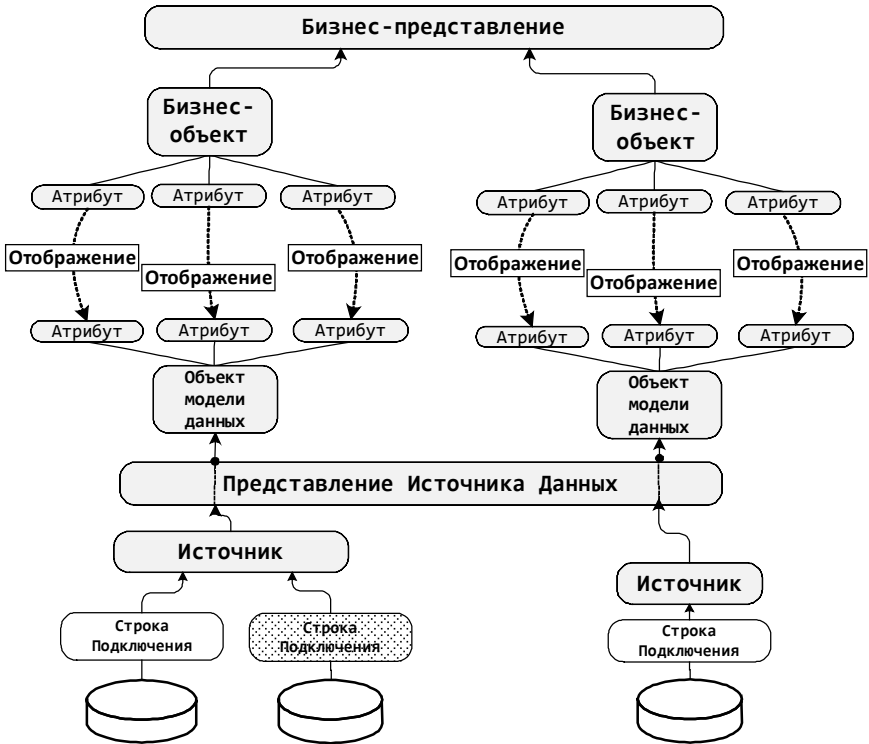


Рис. 1. Схема уровней бизнес-представления и источников данных, связанных через отображение

Уровни бизнес-представления и представления источников данных являются независимыми, связь между ними выполняется через процедуру *отображения*, основное назначение которой заключается в установке соответствия между атрибутами объектов модели данных представления источника и атрибутами бизнес-объектов бизнес-представления. Пример отображения между уровнями данных показан на рис. 1.

Многоуровневый подход к разработке шаблонов отчетов дает ряд преимуществ, так как такое распараллеливание задач ускоряет процесс разработки шаблона. В случае изменения структуры данных на уровне источника не придется вносить радикальные изменения в шаблон, а достаточно будет обеспечить отображение на новую структуру источников данных.

Сервер отчетов обеспечивает генерацию отчетов, где формирование каждого отчета выполняется на основе задания. В состав задания включены шаблон отчета, параметры шаблона отчета, стилевое оформление шаблона отчета, формат хранения данных, расписание генерации отчета. В качестве источников могут выступать реляционные БД, ОРС-сервера.

### Архитектура системы генерации отчетов

Предлагаемая в данной работе архитектура приведена на рис. 2 и включает следующие компоненты:

- Сервер отчетов.
- Клиент отчетов.
- Редактор шаблонов.

Особенностью предлагаемой архитектуры является достаточно ограниченный функционал клиента отчетов. Клиент отчетов представляет возможности по выбору шаблона отчета из списка имеющихся, составлению заданий на генерацию отчетов и просмотр готовых, сгенерированных отчетов. Такой подход был выбран в связи с тем, что для составления самих шаблонов отчетов необходимо иметь соответствующие навыки. Среди этих навыков – знание предметной области и производственных процессов, умение работать с моделью данных системы генерации отчетов и др.

Сервер отчетов обладает богатым функционалом, обеспечивающим процесс генерации. Основные компоненты сервера:

*Менеджер отчетов*, управляющий генерацией отчетов по событию/расписанию/требованию, построением отчета через компоненту *построитель отчета*, а также передачей готовых отчетов по email.

*Генератор отчетов*, работает в соответствии с выбранным шаблоном отчета. В процессе генерации отчета происходит интерпретация шаблона отчета и автоматическое построение запросов к источникам данных в соответствии с имеющимися бизнес-выражениями.

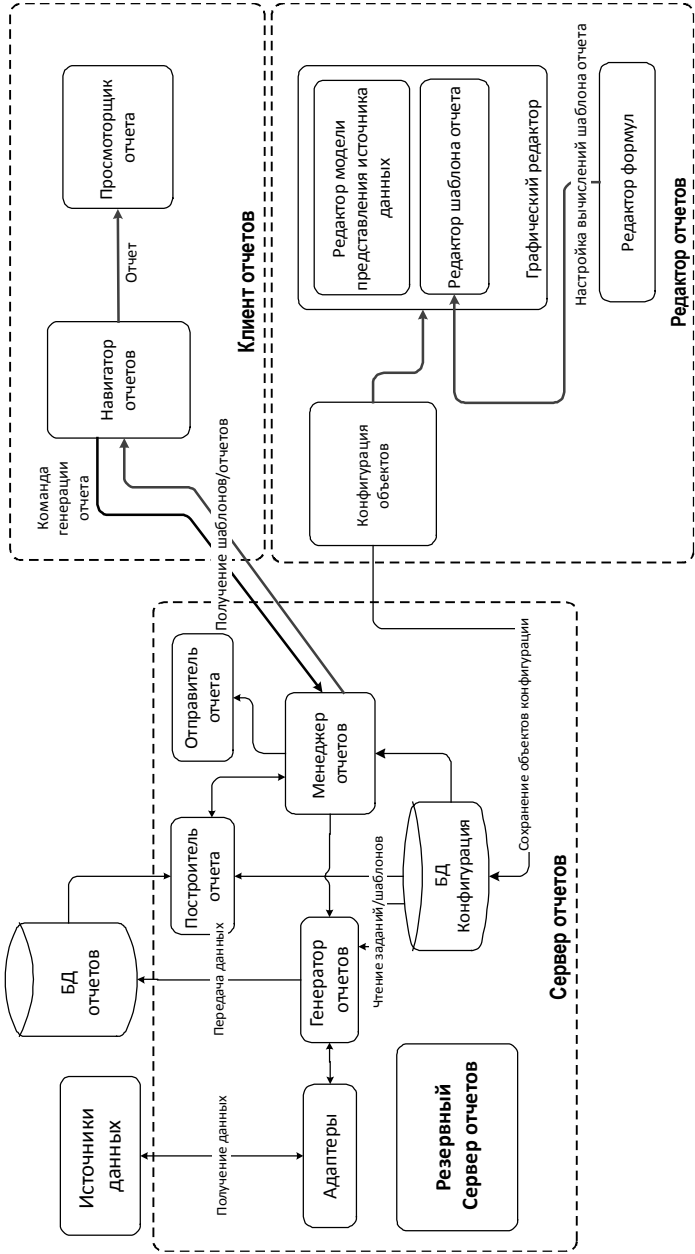


Рис. 2. Архитектура системы генерации отчетов

*Адаптеры* используются для различных типов источников данных. Например, для оперативных и исторических данных используется OPC UA клиент. Для данных, хранящихся в реляционных системах управления базами данных, поддерживающими интерфейс ODBC, используется соответствующий ODBC-адаптер.

С помощью *редактора шаблона* отчета выполняется разработка шаблона отчета в соответствии с двухуровневым подходом. С помощью модуля конфигурации объектов выполняется создание и настройка бизнес-представления и представления источников. Структура отчета формируется с помощью встроенного графического редактора.

Все предложенные компоненты могут быть реализованы с помощью СПО без каких-либо ограничений по функциональности.

### **Основные средства СПО, используемые при разработке системы**

В качестве основного инструмента разработки ПО предлагается использовать мощный кроссплатформенный Фреймворк Qt [12], содержащий элементы пользовательского интерфейса (виджеты), набор шаблонных контейнеров (QString, QVector, QMap, QList, и т.д.) и другие средства. Qt дает возможность использовать написанное на его основе ПО во многих операционных системах, компилируя код для каждой из них не изменяя исходников. Стоит отметить, что Qt имеет в своем составе все необходимое, что может потребоваться для разработки прикладного ПО. Заметим, что для удобства разработки графического интерфейса имеется визуальная среда разработки Qt Designer и модуль Qt Widgets, который предоставляет множество UI-элементов для создания классически-стилизованного пользовательского интерфейса.

Класс QJSEngine, находящийся в модуле Qt Qml, обеспечивает среду для выполнения JavaScript-кода, то есть, другими словами, Qt предоставляет возможность встраивания в приложения функции поддержки скриптов. В рамках данной работы реализуется поддержка скриптов с целью расширения функционала путем назначения обработки данных без реализации внутреннего интерпретатора. Поддержка скриптового языка позволяет более тонко и гибко формировать отчеты, сортировать и фильтровать данные, используя сложные критерии, и т.п. Таким образом, при реализации специализированного встроенного языка отчетов можно использовать скриптовый подход, что позволит избе-

жать написания внутреннего интерпретатора, а исполнения передать соответствующей среде.

С целью организации *сбора данных* с OPC-серверов используется стандарт OPC UA, обеспечивающий совместимость с множеством различных аппаратно-программных платформ и являющийся независимым от каких-либо программных технологий, вычислительных платформ и языков программирования [12]. В качестве источника данных, где данные хранятся в реляционных СУБД, может быть использована любая свободно распространяемая СУБД, поддерживающая интерфейс ODBC. В нашем случае могут рассматриваться MySQL, SQLite, PostgreSQL.

### Заключение

Проведенный анализ различных систем генерации отчетов, реализованных по разным технологиям, позволил выделить общий функционал, характеризующий системы промышленной отчетности. В соответствии с этим, в данной работе предложено решение по системе генерации отчетов, где компоненты системы реализуются на основе свободного программного обеспечения, обеспечивающего реализацию *всех основных функций* для СГО. В соответствии с современными подходами к созданию и генерации форм отчетов, наиболее применяемых в современных системах, было предложено расширение информационной составляющей СГО, которое позволяет ускорить процесс разработки шаблонов отчетов, без конкретной привязки к определенным источникам данных, при которой смена источников не влияет на структуру шаблона отчета. С помощью встроенного языка отчетов осуществляются назначения правил обработки данных, а также способы отображения данных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Батюк С.Г. Время строить отчеты с СПО от Wonderware // Журнал «ИСУП». – 2013. – № 1(43). [Электронный ресурс]. – URL: <http://isup.ru/articles/2/4363/> (дата обращения 10.05.17).
2. Кряжевских Д.В., Одегов В.Е. Оперативное планирование АСУТП Автоматизация в промышленности. – М.: Издательский дом «ИнфоАвтоматизация», 2008. – С. 50–55.
3. Соловьев А.В. Технологии создания отчетов // Труды ИСА РАН. – 2005. – Т. 16.
4. Золотарев С.В., Кудрявцева М.Е. Dream Report – интегрированная система генерации отчетов для АСУ ТП: эффективность и простота использования // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2013. – № 2.



5. Соловьев А.В. Обзор средств генерации отчетов // Документооборот. Концепции и инструментарий // Сборник трудов ИСА РАН / под ред. чл.-корр. РАН В.Л. Арлазарова и д.т.н. проф. Н.Е. Емельянова. – М.: УРСС, 2004. – С. 174–192.
6. Кузнецов И. Подготовка отчетов в Crystal Report // Компьютер-ИНФО. – 2001. – № 18, 19. – С. 21–24.
7. Артамонов И.В. Свободное программное обеспечение: преимущества и недостатки // Известия ИГЭА. – 2012. – № 6. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/svobodnoe-programmnoe-obespechenie-preimuschestva-i-nedostatki> (дата обращения: 26.05.2017).
8. Сачков Д.И. Перспективы внедрения свободного программного обеспечения в сфере государственного управления // Известия ИГЭА. – 2012. – № 5. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vnedreniya-svobodnogo-programmnogo-obespecheniya-v-sfere-gosudarstvennogo-upravleniya> (дата обращения: 29.05.2017).
9. Бунова Е.В., Шурыгин А.Н. Применение свободно распространяемого программного обеспечения для управления ИТ-проектами в госсекторе // Программные продукты и системы. – 2015. – № 1 (109). – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-svobodno-rasprostranyaemogo-programmnogo-obespecheniya-dlya-upravleniya-it-proektami-v-gossektore> (дата обращения: 29.05.2017).
10. Артамонов И.В. Государственная политика в области свободного программного обеспечения: Международный опыт // Известия ИГЭА. – 2013. – № 3. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennaya-politika-v-oblasti-svobodnogo-programmnogo-obespecheniya-mezhdunarodnyy-opyt> (дата обращения: 29.05.2017).
11. Иванцов Д.И., Хрусталева Е.Ю., Чумичкин А.А. Формирование сложноструктурированных документов средствами автоматизированных систем управления // Прикладная информатика. – 2010. – № 2(26). – С. 83–84.
12. Шлее М. Qt 5.3 Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ – Петербург. – 915 с.
13. OPC Foundation. The Industrial Interoperability Standard [Электронный ресурс]. – URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.

# ПРИМЕНЕНИЕ НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА В ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВ

*А.Ф. Зиннатуллин*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Рассмотрена математическая модель наивного байесовского классификатора. Приведен пример реальной задачи с применением рассматриваемого классификатора. Перечислены его основные достоинства и недостатки.

Развитие информационных технологий способствовало решению многочисленных приложений задачи обработки текстовой информации, таких, как задача машинного перевода с одного естественного языка на другой, задача информационного поиска, задача извлечения знаний из текста и др. Однако многие задачи по-прежнему остаются нерешенными. Для их решения необходимы новые эффективные методы и алгоритмы обработки текстовой информации [1].

Цель работы – знакомство с одним из эффективных классификаторов обработки текстовой информации – наивным байесовским алгоритмом.

Наивный байесовский классификатор – это классификатор, основанный на теореме Байеса с допущением того, что наличие одного признака в классе не связано с наличием другого признака. Например, апельсин можно считать фруктом, если он оранжевый и его диаметр составляет порядка семи сантиметров. Несмотря на то, что эти признаки зависят друг от друга или от других признаков, порядок следования этих признаков не имеет значения, они вносят независимый вклад в то, что этот фрукт является апельсином. Благодаря таким допущениям байесовский классификатор называется «наивным» [2, 3].

Рассмотрим математическую модель наивного байесовского алгоритма.

Пусть задано множество объектов  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ . Каждый объект этого множества обладает признаками из множества признаков  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$  и меткой из множества меток  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ .

Необходимо вычислить значение случайной величины  $C$ , при котором достигается апостериорный максимум, то есть  $C_{\text{MAP}}$ :

$$C_{\text{MAP}} = \arg \max P(c|O), c \in C.$$

1. Применим теорему Байеса

$$C_{\text{MAP}} = \arg \max \frac{P(O|c)P(c)}{P(O)}, c \in C.$$

2. Так как вычисляем апостериорный максимум, то значение вероятности  $P(O)$  можно не учитывать:

$$C_{\text{MAP}} = \arg \max P(O|c)P(c), c \in C.$$

3. Чтобы не оперировать со значениями вероятностей, близкими к нулю, вычислим логарифм апостериорного максимума:

$$C_{\text{MAP}} = \arg \max \log(P(O|c)P(c)), c \in C.$$

Так как в наивном байесовском классификаторе вероятность одного признака не связана с вероятностью другого признака и порядок следования признаков не имеет значения, то имеет место следующее выражение:

$$P(l_i \cap l_j | c) = P(l_i | c)P(l_j | c).$$

Учитывая наивность байесовского классификатора, получим

$$\begin{aligned} C_{\text{MAP}} &= \arg \max \log(P(O|c)P(c)) = \arg \max \log P(l_1, l_2, \dots, l_n | c)P(c) = \\ &= \arg \max \log P(c) \prod_{i=1}^r P(l_i | c) = \arg \max \log P(c) + \sum_{i=1}^r P(l_i | c). \end{aligned}$$

### Байесовская фильтрация спама

В качестве применения наивного байесовского классификатора рассмотрим следующую задачу:

Даны три электронных письма. Для каждого письма известен его класс (SPAM – письмо является спамом, NOT-SPAM – письмо не является спамом).

«Для Вас подарок» (SPAM).

«Спешите заказать пояс» (SPAM).

«Надо заказать диван» (NOT-SPAM).

Построим модель классификатора. Для этого определим частоты классов, суммарное количество слов (табл. 1) и частоты каждого слова в каждом классе (табл. 2).

Таблица 1

Параметры	SPAM	NOT-SPAM
Частоты классов	2	1
Суммарное количество слов	6	3

Таблица 2

Слова	SPAM	NOT-SPAM
для	1	0
вас	1	0
подарок	1	0
спешите	1	0
заказать	1	1
пояс	1	0
надо	0	1
диван	0	1

Формулу вычисления апостериорного максимума ( $C_{\text{МАР}}$ ) можно записать в следующем виде:

$$C_{\text{МАР}} = \arg \max \left[ \log \frac{K_C}{K} + \sum_{i \in N} \log \frac{W_{iC} + 1}{|V| + Q_C} \right].$$

Здесь  $K_C$  – количество документов в обучающей выборке принадлежащих классу «С»;  $K$  – общее количество документов в обучающей выборке;  $|V|$  – количество уникальных слов во всех документах в обучающей выборке;  $Q_C$  – суммарное количество слов в документах класса «С» в обучающей выборке;  $W_{iC}$  – частота слова в документах класса «С» в обучающей выборке;  $N$  – множество слов классифицируемого документа (включая повторы).

**Замечание:** необходимо учитывать, что на этапе классификации может встретиться слово, которого не было на этапе обучения. Следовательно, частота данного слова в документе будет равна нулю и необходимо вычислить логарифм нуля, который не существует. Решением

данной проблемы является «сглаживание Лапласа». Смысл «сглаживания» в том, что мы прибавляем единицу к частоте каждого слова. Именно поэтому в числителе вышеуказанной формулы вычисления апостериорного максимума прибавляется единица.

Слово «заказать» присутствует во всех двух классах. В качестве примера возьмем фразу «надо заказать еду».

Рассчитаем значение фразы для класса SPAM:

$$\log \frac{2}{3} + \log \frac{1}{8+6} + \log \frac{2}{8+6} + \log \frac{1}{8+6} \approx -7,629.$$

Рассчитаем значение выражения для класса NOT-SPAM:

$$\log \frac{1}{3} + \log \frac{2}{8+3} + \log \frac{2}{8+3} + \log \frac{1}{8+3} \approx -6,906$$

Так как значение фразы класса SPAM меньше значение фразы класса NOT-SPAM, то данная фраза не будет отмечена как спам.

### Достоинства наивного байесовского классификатора

- Для классификации необходимо малое количество данных для обучения.
- Лучше работает с категориальными признаками, чем с непрерывными. В непрерывных используется распределение Гаусса, что является сильным допущением.
- Возможность прогноза во время вычисления вероятностей.
- Быстрота и эффективность относительно пространства.

### Недостатки наивного байесовского классификатора

- Значения спрогнозированных вероятностей не всегда точны.
- Допущение независимости признаков. Наборы полностью независимых признаков очень редко встречаются.
- В случае, когда условная вероятность равна нулю.

### Заключение

В данной работе рассмотрена математическая модель наивного байесовского классификатора. Приведен пример решения задачи с применением данного классификатора. Перечислены его основные достоинства и недостатки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. – М.: ЮНИТИ-ДАТА, 2010. – 551 с.
2. *Nelson E.* Regular probability measures on function space // *Ann. Math.* – 1959. – V. 69. – P. 630–643.
3. *Ризаев И.С., Шарнин Л.М., Яхина З.Т.* Выделение объектов на основе байесовской классификации // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015): труды Международной научно-технической конференции СГАУ. – Самара, 2015. – С. 112–115.

# РАСПОЗНАВАНИЕ ГРАНЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

*Ю.Л. Костюк, М.И. Литовченко*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Технология получения данных с помощью лазерного сканирования основана на использовании геодезических приборов – лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта с высокой скоростью порядка десятков тысяч точек в секунду. Полученный набор точек (облако точек) после обработки может быть представлен в виде трехмерной модели объекта, плоского чертежа, набора сечений или поверхности [1, 2].

Существует множество алгоритмов для выделения объектов по облаку точек, но зачастую человек играет основную роль в корректном обнаружении границ поверхности объекта и определения принадлежности его к определенному классу. Поэтому актуальной остается задача автоматизированного распознавания объектов, типичных для той или иной ситуации.

Ряд алгоритмов основан на предварительном построении тетраэдризации Делоне, т.е. пространственной триангуляции по облаку точек [1], однако в силу высокой трудоемкости таким способом сложно обрабатывать очень большие наборы точек. Другие алгоритмы специализируются на распознавании объектов, специфичных для отдельных областей применения, например для автомобильных дорог [2].

В данной работе детализируется и развивается подход, предложенный в [3], когда облако точек получено для совокупности объектов с большой протяженностью по координатам  $X$  и  $Y$  и небольшой – по  $Z$ . При этом сначала строится триангуляция в плоскости  $OXY$ , игнорируя координаты по  $Z$ , а затем, для выделения объектов, исследуются полученные треугольники с учетом координат по  $Z$ , в результате чего удастся распознавать вертикально расположенные грани трехмерных объектов.

## Построение триангуляции

Известно большое количество алгоритмов построения триангуляции, в частности триангуляции Делоне (в такой триангуляции окружность, описанная вокруг любого треугольника, не должна содержать внутри себя ни одной точки). Одним из наиболее быстродействующих (с ли-

нейной трудоемкостью в среднем) является алгоритм с динамическим кэшированным поиском треугольников [4].

Наряду с триангуляцией Делоне, в принципе, возможно использовать оптимальную триангуляцию, в которой сумма длин всех ребер триангуляции минимальна, однако задача её точного построения является NP-трудной, т.е. практически не выполнимой уже для 100 точек. Вместо точной оптимальной можно строить локально оптимальную триангуляцию [5], используя в качестве начального приближения триангуляцию Делоне. Однако при относительно равномерном рассеянии точек в плоскости  $OXY$  все эти разновидности триангуляций не имеют особых преимуществ друг перед другом. Более того, построение триангуляции можно заметно ускорить, если вместо условия Делоне проверять условие минимальной длины ребра для каждой пары смежных по ребру треугольников, как это показано на рис. 1.

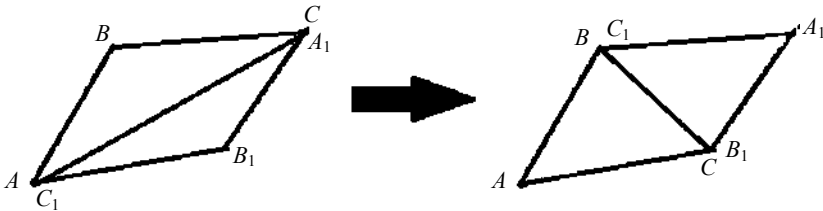


Рис. 1. Перестроение треугольников, не удовлетворяющих условию минимальной длины ребра

Кроме того, чтобы алгоритм построения триангуляции всегда работал корректно (не возникали вырожденные треугольники), исходные координаты точек предварительно следует масштабировать так, чтобы они стали целочисленными. Для этого их надо разделить на фиксированную малую величину – погрешность измерений.

При построении плоской триангуляции по облаку точек часто возникает ситуация, когда несколько точек имеют одинаковые пары координат  $X$  и  $Y$ , но различные координаты по  $Z$ . При этом в результирующую триангуляцию попадёт только одна из таких (кратных) точек, остальные будут потеряны. Чтобы этого не случилось, перед триангуляцией точки следует упорядочить в лексикографическом порядке:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Так как количество точек может измеряться миллионами, целесообразно применять цифровую сортировку (с линейной трудоемкостью), упорядочивая точки вначале по координате  $Z$ , затем по  $Y$  и в конце по  $X$ .



При работе алгоритма построения триангуляции, когда точки включаются в триангуляцию последовательно, в плоскую триангуляцию попадет первая из группы подряд идущих кратных точек (с минимальной координатой  $Z$ ), остальные точки будут пропущены, но им будут приписаны признаки кратности. В последующем, при анализе пространственных треугольников, все такие кратные точки будут учтены, как показано на рис. 2.

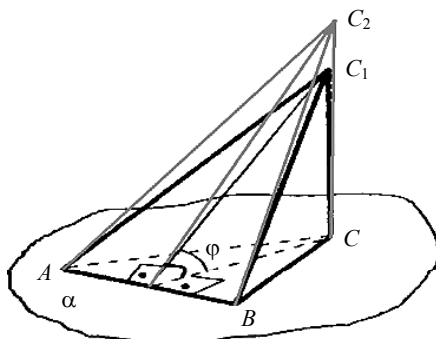


Рис. 2. Пример пространственной триангуляции, когда треугольники имеют кратные точки

### Распознавание вертикальных граней

После построения плоской триангуляции необходимо учесть координату  $Z$  в точках. Для этого последовательно просматриваются все треугольники и помечаются те из них, которые удовлетворяют хотя бы одному из «критериев вертикальности»:

- наличие кратных точек хотя бы у одной вершины треугольника;
- угол  $\varphi$  между плоскостью треугольника и плоскостью  $XOY$  отличается от  $90^\circ$  менее чем на заданную малую величину  $\varepsilon$ .

Угол наклона между двумя плоскостями, заданными уравнениями

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \text{ и } A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0,$$

вычисляется по формуле

$$\cos \varphi = \left| \frac{A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot B_2 + C_1 \cdot C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \right|. \quad (1)$$

Здесь и далее использованы формулы из справочника [6].

Плоскость  $XOY$  описывается уравнением  $z = 0$ , в нем коэффициенты  $A_2, B_2, D_2$  равны нулю, а коэффициент  $C_2 = 1$ .

Уравнение плоскости, в которой лежит треугольник, вычисляется по формуле

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты  $i$ -й точки треугольника,  $i = 0, 1, 2$ .

Из уравнения (2) вычисляются коэффициенты  $A_1, B_1, C_1$  уравнения плоскости треугольника:

$$A_1 = \begin{vmatrix} y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix}, \quad B_1 = - \begin{vmatrix} x_1 - x_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix}, \quad C_1 = \begin{vmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Тогда формула (1) для вычисления угла наклона  $\varphi$  треугольника к плоскости  $XOY$  преобразуется к виду

$$\cos \varphi = \left| \frac{C_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \right|. \quad (4)$$

В результате просмотра в цикле всех треугольников триангуляции формируется список «вертикальных» треугольников.

На следующем этапе из этого списка производится выделение таких групп смежных треугольников, которые принадлежат одной и той же вертикальной грани. Для этого вначале просматривается список «вертикальных» треугольников и из них ищется не менее трех смежных треугольников, таких, что для каждой из трех пар треугольников взаимные углы между их плоскостями не превышают заданную величину  $\varepsilon$ . Углы вычисляются по формулам (1), (2). При этом учитываются кратные точки (если они есть) в треугольниках.

После этого к выделенным треугольникам просмотром вглубь добавляются такие смежные «вертикальные» треугольники, у которых взаимные углы между их плоскостями не превышают заданную величину  $\varepsilon$ . В результате будет сформирована группа смежных треугольников для одной и той же вертикальной грани.

После выделения такой группы просмотр списка «вертикальных» треугольников продолжается, выделяется еще одна группа и т.д.

### Аппроксимация вертикальной грани

Для каждой выделенной группы «вертикальных» треугольников можно методом наименьших квадратов вычислить наиболее близкую к ним вертикальную грань. Приведем уравнение плоскости для неё:

$$Ax + By + 1 = 0. \tag{5}$$

Сумму квадратов расстояний от всех точек  $(x_i, y_i, z_i)$  выделенной группы треугольников до вертикальной грани (5) следует минимизировать:

$$F(A, B) = \sum_{i=1}^n (Ax_i + By_i + 1)^2 \rightarrow \min_{A, B}. \tag{6}$$

Для этого необходимо вычислить частные производные функции  $F(A, B)$  по параметрам  $A$  и  $B$  и приравнять их к нулю. В результате получится система уравнений:

$$\begin{cases} A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i y_i = -\sum_{i=1}^n x_i, \\ A \sum_{i=1}^n x_i y_i + B \sum_{i=1}^n y_i^2 = -\sum_{i=1}^n y_i, \end{cases} \tag{7}$$

решив которую, получим выражения для вычисления коэффициентов в уравнении плоскости для вертикальной грани (5):

$$A = \frac{ce - bd}{c^2 - ab}, \quad B = \frac{cd - ae}{c^2 - ab}, \tag{8}$$

где  $a = \sum_{i=1}^n x_i^2$ ,  $b = \sum_{i=1}^n y_i^2$ ,  $c = \sum_{i=1}^n x_i y_i$ ,  $d = -\sum_{i=1}^n x_i$ ,  $e = -\sum_{i=1}^n y_i$ . (9)

Проекция вертикальной грани на плоскость  $XOY$  представляет собой отрезок, его граничные точки можно вычислить следующим образом. Если в уравнении (5)  $A = 0$ , то необходимо найти минимум и максимум по координате  $X$  среди всех точек  $(x_i, y_i)$  выделенной группы треугольников. Координаты по  $Y$  при этом равны  $-1/B$ . Если в уравнении (5)  $B = 0$ , то минимум и максимум надо искать по координате  $Y$ , а координаты по  $X$  равны  $-1/A$ .

Если  $A \neq 0$  и  $B \neq 0$ , то через все точки  $(x_i, y_i)$  нужно провести перпендикуляры к прямой (5) и найти точки пересечения  $(x_{0i}, y_{0i})$  с прямой (5), а среди них найти минимум и максимум по координате  $X$  или  $Y$ .

Уравнение перпендикуляра к прямой (5):  $Bx - Ay + C = 0$ , а так как он проходит через точку  $(x_i, y_i)$ , то  $C = Ay_i - Bx_i$ . Координаты точки пересечения  $(x_{0i}, y_{0i})$  должны удовлетворять системе уравнений:

$$\begin{cases} Bx_{0i} - Ay_{0i} + (Ay_i - Bx_i) = 0, \\ Ax_{0i} + By_{0i} + 1 = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Её решение:

$$\begin{aligned} x_{0i} &= -(A + B(Ay_i - Bx_i))/(A^2 + B^2), \\ y_{0i} &= (A(Ay_i - Bx_i) - B)/(A^2 + B^2). \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 3 приведен пример триангуляции, построенной по случайно разбросанным в квадрате точкам с малыми координатами по  $Z$  и точкам, находящимся на вертикальной грани. Жирной линией изображена проекция распознанной и аппроксимированной вертикальной грани.

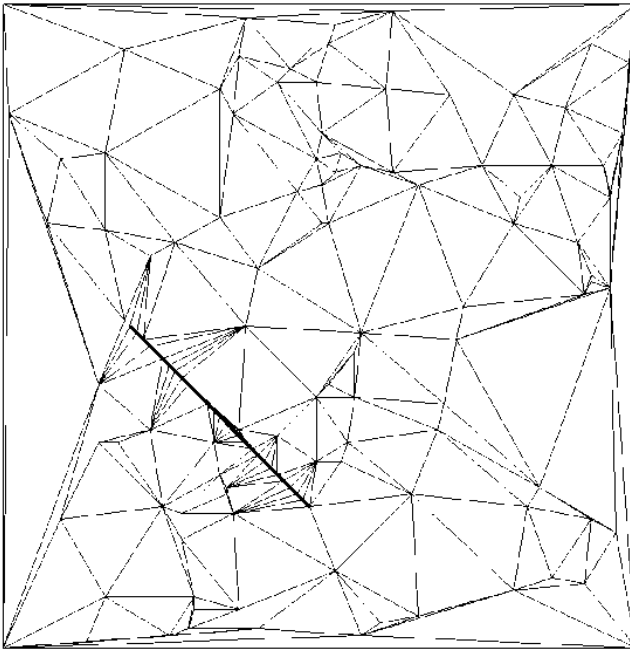


Рис. 3. Триангуляция и проекция аппроксимированной вертикальной грани, образованной группой смежных треугольников

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алсынбаев К.С.* Алгоритмы определения тел объемных объектов в трехмерном нерегулярном облаке точек // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математич. и технич. науки. – 2015. – Вып. 10. – С. 159–165.
2. *Li D. and Elberink S.O.* Optimizing Detection of Road Furniture (Pole-like Objects) in Mobile Laser Scanner Data // ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, 11 – 13 November 2013, Antalya, Turkey. – P. 163–168.
3. *Костюк Ю.Л., Гульбин К.Г., Пешехонов С.В.* Построение поверхностной триангуляции и выделение пространственных фигур по данным лазерного сканирования // Вестник Том. гос. ун-та. Сер. Информатика, кибернетика, математика. – 2006. – № 293. – С. 151–155.
4. *Скворцов А.В., Костюк Ю.Л.* Эффективные алгоритмы построения триангуляции Делоне // Геоинформатика. Теория и практика. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – С. 22–47.
5. *Костюк Ю.Л., Фукс А.Л.* Приближенное вычисление оптимальной триангуляции // Геоинформатика. Теория и практика. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. С. 61–66.
6. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1973. – 870 с.

# РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЙ НЕФТЕПРОВОДА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ ДАТЧИКОВ

*Ю.Л. Костюк, М.В. Рубинский*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Постоянно растущие требования к безопасности промышленных систем, в частности нефтепроводов, делают необходимым осуществление для них постоянного мониторинга. Для этого в определенных местах трубопроводов устанавливаются датчики, измеряющие давление и другие параметры функционирования системы. Измеренные значения параметров в режиме реального времени поступают в систему управления и записываются для их последующего анализа. В частности, в работе [1] описан анализ измерений от датчиков, установленных в соплах авиационных двигателей, а в работе [2] – анализ функционирования нефтепровода. В общем случае последовательные значения некоторого параметра как функции, зависящей от времени, представляют случайный процесс, для анализа которого можно использовать преобразование Фурье или Хартли [3], а также вейвлет-анализ [4].

## Постановка задачи

В данной работе рассматривается участок нефтепровода, показанной на рис. 1. Стрелками обозначены шесть клапанов и датчик давления, данные о состоянии каждого из клапанов, а также датчика давления поступают не реже одного раза в секунду. Эти данные можно представить в виде таблицы, в каждой строке которой записан момент времени измерения, величина давления (бар), а также данные о состоянии клапанов (открыто или закрыто).

На рис. 2 представлен фрагмент графика величины давления как функции времени. Кроме того, в виде столбцов на графике обозначены моменты изменения состояния клапанов В1 и В2. Светло-серые столбцы соответствуют изменению состояния клапана В1, а черные – клапану В2. При стационарном функционировании нефтепровода состояния других клапанов не изменялись.

Короткие интервалы времени (от нескольких десятков до ста и более секунд) соответствуют неизменному состоянию всех клапанов. В каж-

дом таком интервале давление в среднем уменьшается. В конце каждого такого интервала срабатывает клапан В1 (а иногда и клапан В2), после чего давление резко увеличивается. В результате несколько последовательных коротких интервалов объединяются в группу, в конце которой срабатывают оба клапана (В1 и В2).

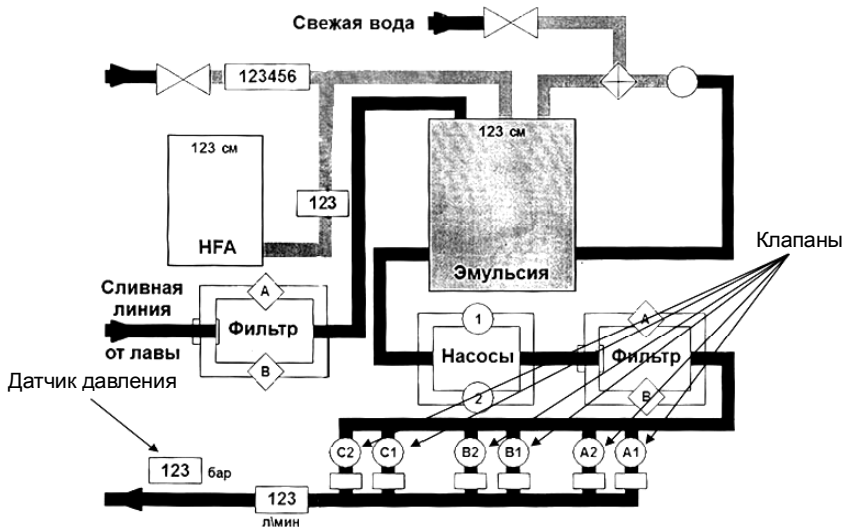


Рис. 1. Схема исследованной системы

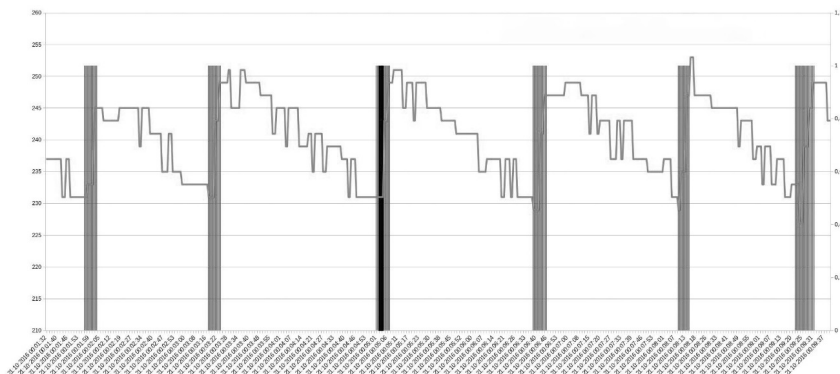


Рис. 2. График зависимости изменения давления от состояния клапанов

На основе этих рассуждений для анализа данных были использованы следующие методы:

- преобразование Хартли для каждой группы коротких интервалов;
- вейвлет-преобразование для каждого короткого интервала;
- вычисление первой и второй производных для каждого текущего момента времени.

### Преобразование Хартли

Дискретное преобразование Хартли является разновидностью дискретного ортогонального тригонометрического преобразования, тесно связанное с дискретным преобразованием Фурье [3]. Его основное отличие от последнего состоит в том, что оно преобразует вещественные данные в вещественные результаты без использования комплексных чисел. Данное преобразование выражено следующей формулой:

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_n \sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi}{N} nk - \frac{\pi}{4}\right), \quad (1)$$

где  $N$  – длина последовательности отсчетов давления в группе коротких интервалов;  $h_n$  – величина давления;  $n$  – номер отсчета в последовательности  $N$ ;  $k$  – индекс преобразования.

Совокупность величин  $H_k$ , полученных после преобразования Хартли, представляет спектр, т.е. амплитуды резких и медленных изменений кривой давления для группы коротких интервалов. На рис. 3 представлен пример преобразования Хартли. Здесь по оси  $OX$  отложен индекс

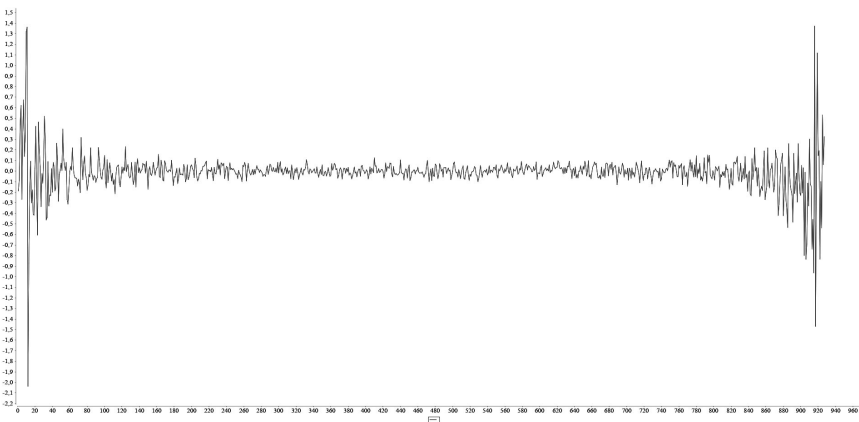


Рис. 3. График преобразования Хартли



преобразования в диапазоне от 0 до  $N - 1$ , а по оси  $OY$  – спектр Хартли. Основная центральная часть графика представляет колебания спектра с амплитудой, близкой к нулю.

Если для двух групп коротких интервалов вычислить спектры Хартли, то можно найти разность спектров или их огибающих, которые будут характеризовать различие этих двух спектров. Если, кроме того, задать пороговое значение для такой разности, то это можно использовать в качестве меры различия для двух групп коротких интервалов и соответственно классифицировать группы коротких интервалов на «хорошие» и «плохие».

### Вейвлет-преобразование

Дискретное вейвлет-преобразование для последовательности отсчетов давления  $h_0, h_1, \dots, h_{n-1}$  в коротком интервале вычисляется следующим образом. Вначале вычисляется  $A_0$  – среднее арифметическое для всех значений интервала:

$$A_0 = \sum_{j=0}^{n-1} h_j / n. \quad (2)$$

Затем весь интервал разбивается на две равные (или почти равные) части и для каждой части вычисляются два средних  $A_1$  и  $A_2$  соответственно. Далее каждая из частей разбивается на свои две части и для них вычисляются соответственно средние  $A_3, A_4, A_5, A_6$  и т.д.

Вейвлет-преобразование представляет последовательность величин  $W_0, W_1, W_2, \dots$ , которые вычисляются следующим образом:

$$W_0 = A_0, W_1 = A_1 - A_0, W_2 = A_2 - A_0, W_3 = A_3 - A_1, W_4 = A_4 - A_1, \text{ и т.д.}$$

Если  $n$  равно точной степени 2, то средние  $A_0, \dots$  и величины  $W_0, \dots$  можно вычислять в обратном порядке по следующим рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} A_{i+n-1} &= h_i, & \text{для } i &= n-1, \dots, 1, 0; \\ A_i &= (A_{2i+1} + A_{2i+2})/2, & \text{для } i &= n-2, \dots, 1, 0; \\ W_i &= A_i - A_{(i-1)/2}, & \text{для } i &= 2n-2, \dots, 1; \\ W_0 &= A_0. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 4 представлен пример вейвлет-преобразования на одном из коротких интервалов для  $n = 16$ . Здесь величины, начиная с  $W_1$ , оказались близкими к нулю.

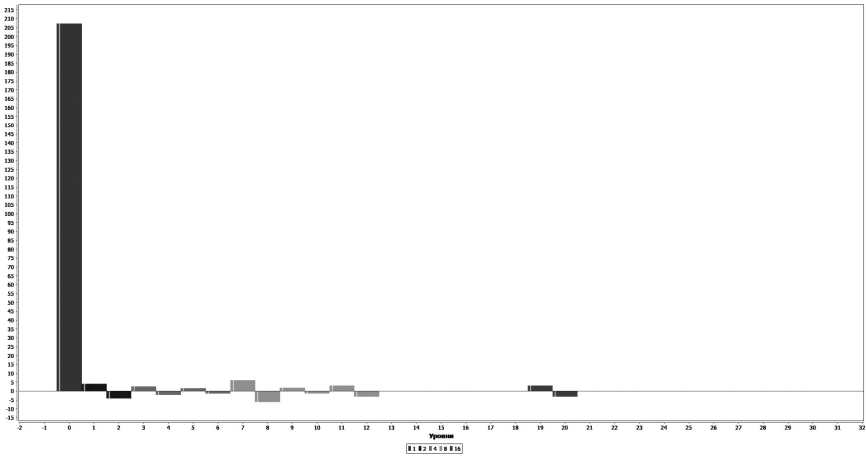


Рис. 4. Графики вейвлет-преобразования по уровням

Если для двух коротких интервалов вычислить вейвлет-преобразования, то разность между ними можно использовать как величину «расстояния» и на этой основе классифицировать короткие интервалы на «хорошие» и «плохие».

### Первая и вторая производные давления

Первая производная  $v_i$  и вторая производная  $a_i$  на коротком интервале вычисляются по формулам

$$v_i = h_i - h_{i-1} \text{ для } i = 1, \dots, n-1, \quad (4)$$

$$a_i = v_i - v_{i-1} \text{ для } i = 1, \dots, n-2.$$

На рис. 5 представлен пример этих производных на одном из коротких интервалов. По оси  $Ox$  отложено время в секундах. Большая положительная или отрицательная величина первой производной позволяет в оперативном режиме отследить резкое изменение давления, а вторая производная – резкое изменение скорости изменения давления (гидравлический удар).

Эти величины можно вычислять в темпе измерения давления и сразу же использовать в системе автоматического управления нефтепроводом, а при превышении допустимого порога – для оповещения диспетчера.

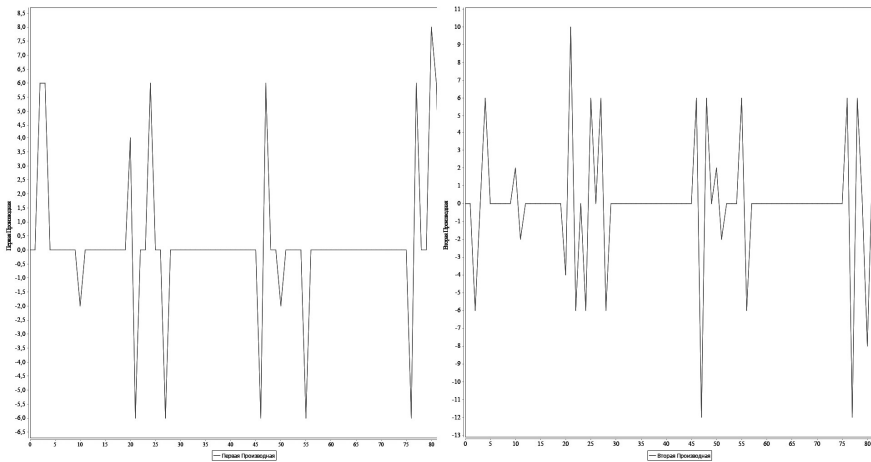


Рис. 5. Графики первой (слева) и второй (справа) производных

### Заключение

Преобразование Хартли (1) позволяет анализировать данные пост-фактум для каждой из групп коротких интервалов, а вейвлет-преобразование (2), (3) – анализировать данные каждого короткого интервала в отдельности. Оба преобразования позволяют оценивать систему в историческом разрезе.

Вычисление первой и второй производных (4) в темпе получения измерений дает возможность оперативно оценить изменение давления и своевременно информировать о критических ситуациях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Енчев С.В., Товкач С.С. Вейвлет-анализ параметров систем автоматического управления авиационных двигателей // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204. – С. 90–96.
2. Abushanab W.S. Oil transmission pipelines condition monitoring using wavelet analysis and ultrasonic techniques // The Engineering. – 2013. – V. 5. – No 6. – P. 551–555. DOI: 10.4236/eng.2013.56066.
3. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 174 с.
4. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

# РАСШИРЕНИЕ СТАНДАРТА IFC ALIGNMENT И КЛАССИФИКАТОРА OMNICLASS ДЛЯ ДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

*Т.С. Ламонова, Н.С. Мирза*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В ходе развития технологий автоматизированного проектирования была сформулирована новая архитектурная концепция. Современный взгляд на проектирование, строительство и эксплуатацию предполагает взаимосвязь всех действующих лиц и соответствующих программных продуктов. Данная идея появилась около десяти лет назад в архитектуре и успешно развилась в BIM (Building Information Modeling).

Успех BIM для архитектуры спровоцировал желание применить подобные методы для других САПР. Однако процесс адаптации оказался не так прост и столкнулся с необходимостью существенных изменений и доработок [1]. В связи с этим начался процесс формирования базового стандарта BIM для инфраструктуры.

В сфере строительства существует большое количество типов объектов. Для структуризации и более удобной работы с ними создаются системы, нацеленные на классификацию объектов в определенной отрасли. На данный момент существует множество подобных систем для архитектуры: OmniClass (США) [2], Uniclass (Великобритания) и др. Эти системы представляют собой иерархию объектов строительства. Несмотря на то, что они изначально были созданы для строительства зданий, в таблицах классификаторов содержится много типов, относящихся и к дорожной отрасли. В данной работе использован классификатор OmniClass.

В качестве основы обеспечения взаимосвязи смежных программных продуктов используется специальный обменный формат IFC [3]. На сегодняшний день уже было утверждено несколько его редакций и ведётся активная разработка универсального формата, который бы позволил обмениваться данными любым программным системам смежных отраслей.

Не так давно была утверждена первая версия IFC Alignment, стандарта, который станет основой последующих версий IFC для инфраструктуры [4]. Однако на данный момент стандарт предоставляет не-

полный функционал для использования его в САПР автодорог. Целью данной работы является расширение текущего стандарта IFC Alignment для его использования в сфере дорожного строительства.

### Прилегающие объекты

В рассматриваемой отрасли к прилегающим объектам относятся, например, дорожные знаки, изгороди, природные объекты (деревья, водоемы).

Для начала определим, что основой для описания любого объекта является точка в трехмерном пространстве. Общий вид точки в IFC-формате выглядит следующим образом:

```
#i = IFC3DPOINT((x,y,z));
```

Также обязательным при описании прилегающих объектов является свойство State. Оно может принимать одно из двух значений: Initial (исходное) или Project (проектное). Исходное состояние означает, что объект уже существует на момент начала проектирования, проектное состояние – то, которое требуется для данного проекта, но отличается от исходного.

Все прилегающие объекты дорожной отрасли можно разбить на три группы: точечные, линейно протяженные и площадные. Точечный объект (IFCPOINTOBJECT) описывается его состоянием, трехмерной точкой и кодом классификатора OmniClass. Ниже приведен пример описания дорожного знака в IFC-формате:

```
#13 = IFC3DPOINT((100.13,2.48,204.93));  
#14 = IFCPOINTOBJECT('INITIAL',#13,'12-14 24 35');
```

Линейно протяженный объект (IFCLINEOBJECT) описывается так же, как и точечный, но координатой является уже массив точек, образующий кривую. Описание линейно протяженного объекта на примере трубопровода выглядит следующим образом:

```
#16 = IFC3DPOINT((99.94,2.53,192.03));  
#17 = IFC3DPOINT((100.13,2.51,194.34));  
#18 = IFC3DPOINT((102.02,2.50,195.39));  
#19 = IFCLINEOBJECT('PROJECT',(#16,#17,#18),'11-42 27 17');
```

Площадной объект (IFCPOLYGONOBJECT) имеет те же свойства, что и линейный, но особенностью такой группы объектов является то, что массив точек образует замкнутую фигуру. Пример описания площадного объекта представлен ниже:

```
#23 = IFC3DPOINT((114.31,2.52,221.43));
#24 = IFC3DPOINT((114.30,2.49,226.50));
#25 = IFC3DPOINT((113.90,2.50,224.37));
#26 = IFCPOLYGONOBJECT('INITIAL',(23,#24,#25),'12-21 21 25 11');
```

Все прилегающие объекты в совокупности позволяют описать поверхность (IFCSURFACE). Кроме массива прилегающих объектов она также имеет свойство State, рассмотренное ранее. Для наглядности на рис. 1 представлена диаграмма классов для прилегающих объектов и поверхности.

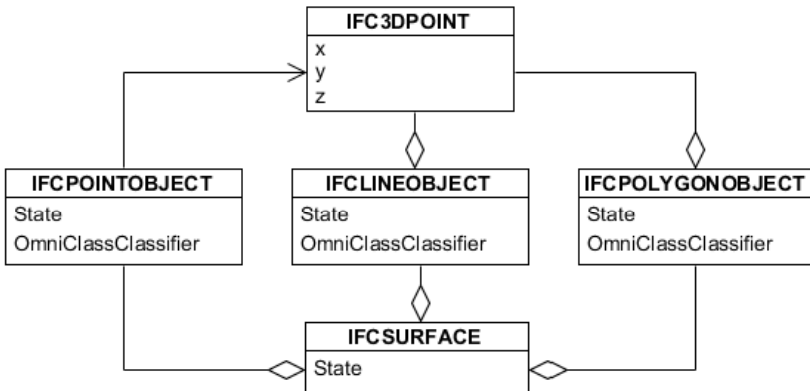


Рис. 1. Диаграмма классов прилегающих объектов

### Поперечный профиль линейно протяженного объекта

Существующий стандарт IFC Alignment позволяет описать ось линейно протяженного объекта в плане и в продольном профиле. Однако важным аспектом при проектировании автодороги является ее поперечный профиль, который на данный момент нельзя описать с помощью стандарта.

Поперечный профиль линейно протяженного объекта приведен на рис. 2.

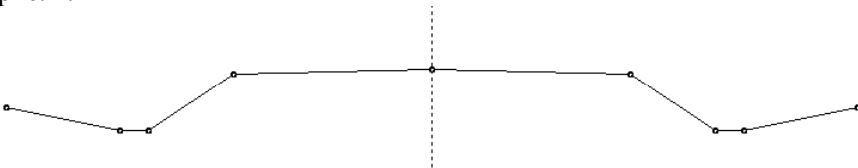


Рис. 2. Поперечный профиль дороги

Поперечный профиль дороги имеет следующие свойства:

1. Picket – расстояние от начала оси до данного среза.
2. Массив сегментов среза. Для их описания использован стандартный отрезок IfcLineSegment2D с добавлением кода классификатора OmniClass для каждого сегмента. Так описывается качественный состав дороги: полосы движения, наличие разделительной полосы и так далее.
3. Key – логическое свойство, определяющее, является ли срез ключевым. Ключевые срезы находятся в тех точках, где ось меняет траекторию, изменяется размер сегментов поперечного профиля и так далее.

На рис. 3 представлена диаграмма классов для описания поперечного профиля линейно протяженного объекта.

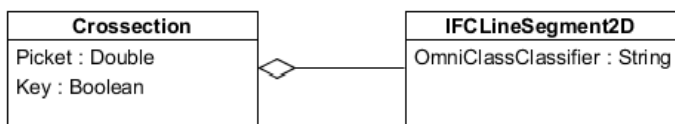


Рис. 3. Диаграмма классов для поперечного профиля

### Полное описание линейно протяженного объекта

В результате добавления к стандарту описания поперечного профиля можно полностью описать сложный линейно протяженный объект как совокупность описания оси в плане и в продольном профиле, а также массива поперечных профилей дороги. Пусть #20 – объект в плане, #21 – объект в продольном профиле, #22, #23, #24, #25, #26 – продольные профили объекта. Тогда полное описание дороги (IFCLINEARSURFACE) в формате IFC будет выглядеть так:

#27 = IFCLINEAROBJECTSURFACE(#20,#21,( #22, #23, #24, #25, #26));

На рис. 4 приведена диаграмма классов для описания дороги.

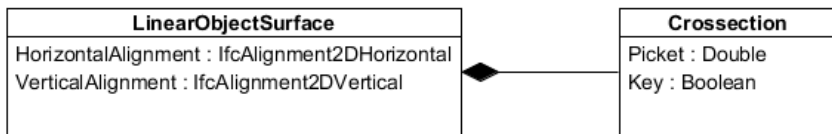


Рис. 4. Диаграмма классов для полного описания дороги

### Расширение классификатора OmniClass

В ходе описания поперечного профиля оказалось, что таблицы классификатора OmniClass не содержат специфических для дорожной отрасли классов, таких, как кювет, разделительная полоса и так далее. Поэтому необходимо расширить существующую классификацию.

Наиболее подходящей для рассматриваемой отрасли является таблица 11, классифицирующая объекты по функции. Родительский класс для сегментов поперечного профиля дороги – это класс Transportation Facility.

Класс Transportation Facility имеет код 11-51-00 в классификации OmniClass, значит, все элементы поперечного профиля (класс Road Elements) будут иметь префикс 11-51. Также имена линий, взятые из системы IndorCAD/Road, были переведены на английский язык в целях дальнейшего расширения классификатора OmniClass. Таким образом была расширена существующая таблица системы, новые элементы представлены на рис. 5.

Classifier code	Level 1	Level 2
11-51-90-00	Top of the project surface	
11-51-90-10		Centerline
11-51-90-11		Dividing line
11-51-90-12		Edgeband
11-51-90-13		Roadside
11-51-90-14		Lane
11-51-90-15		Inner curb
11-51-90-16		Inner edge
11-51-90-17		Safety strip
11-51-90-18		Outer curb
11-51-90-19		Lawn
11-51-90-20		Passage
11-51-90-21		Communication corridor
11-51-90-22		Inner edge of the sidewalk
11-51-90-23		Sidewalk
11-51-90-24		Outer edge of the sidewalk
11-51-90-25		Safety zone
11-51-90-26		Additional lane
11-51-90-27		Bus pocket
11-51-90-28		Lane 1
11-51-91-00	Slope	
11-51-91-10		Inner slope
11-51-90-11		Inner slope flat
11-51-91-12		Slope
11-51-91-13		Inner slope 1
11-51-90-14		Outer slope
11-51-91-15		Outer slope flat
11-51-91-16		Rise
11-51-90-17	Outer slope 1	
11-51-92-00	Ditch	
11-51-92-10		Regiment
11-51-92-11		Ditch
11-51-92-12		Ditch bottom

Рис. 5. Расширение таблицы 11 классификатора OmniClass



### Заключение

В данной работе представлен проект расширения стандарта IFC Alignment, ориентированный на дорожную отрасль. Данная разработка способна существенно развить технологии информационного моделирования для инфраструктуры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов А.В. BIM для дорожной отрасли: что-то новое или мы этим уже занимаемся? // САПР и ГИС. – 2014. – №1(2). – С. 8–11.
2. *OmniClass*: a strategy for classifying the built environment [Electronic resource] // *OmniClass*<sup>TM</sup>. – URL: <http://www.omniclass.org> (access date: 13.04.2017).
3. *IFC* – Industry Foundation Classes [Electronic resource] // IFC Wiki. – URL: [http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC\\_Wiki](http://www.ifcwiki.org/index.php?title=IFC_Wiki) (access date: 17.04.2017).
4. *IFC4x1* Alignment Extension – 1.0.1: Annex E [Electronic resource] // BuildingSMART International Limited. – URL: <http://www.buildingsmart-tech.org/mvd/IFC4x1/Alignment/1.0.1/html/link/annex-e.htm> (access date: 14.04.2017).

## **АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПЕПТИДНЫХ МАТРИЦ**

*И.Е. Лялюхова, Е.Ю. Перец, О.Д. Стогнушко, В.С. Андриющенко*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Часто при решении задач классификации данных большой размерности необходимо решать проблему выбора информативных признаков. Особенно остро проблема анализа информативности ощущается в задачах диагностики заболеваний по биомедицинским данным [1–3]. Существует много подходов к отбору информативных признаков – например на основе дискретных методов поиска в обучающей выборке информативной зоны [4, 5], методов кластеризации [6–8], предположения о нормальности распределений объектов в кластерах [9–11], теоретико-информационного понятия энтропии [12, 13], непараметрических оценок плотности распределения [14]. В медицине статистика является одним из инструментов анализа экспериментальных данных и клинических наблюдений. Как правило, при решении задач рекомендуют исследовать параметрические критерии и только иногда – непараметрические [15].

Одним из перспективных методов ранней диагностики заболеваний является метод с использованием иммуносигнатуры [1]. Иммуносигнатуры представляют собой набор пептидов, которые при взаимодействии с сывороткой крови определяют наличие и тип заболеваний [2]. Микрочипы с пептидными матрицами характеризуются большой размерностью. Например, они могут состоять из 10 000 или даже из 300 000 элементов. Очевидно, решение задачи классификации для диагностики заболеваний при такой размерности признакового пространства требует отбора признаков, необходимого и достаточного для классификации с требуемой точностью.

В связи с этим в данной работе предлагается решение следующих поставленных задач:

1. Исследовать применения различных статистических критериев и их совместное использование с целью выявления наиболее репрезентативных признаков, подлежащих дальнейшей классификации.
2. Оценить связь между выборками, полученными с помощью разных критериев, и определить влияние каждой такой выборки на результаты работы некоторых классификаторов.

3. Определить методологию сокращения репрезентативной выборки без ущерба для точности классификации как для двухклассового подхода, так и для многоклассового.

### 1. Подход к интегрированному анализу информативности признаков

Для любого статистического теста выдвигается две противоположные гипотезы. Одна называется альтернативной гипотезой (ее обозначают  $H_1$ ), другая – нулевой гипотезой (обозначается  $H_0$ ). Нулевая гипотеза всегда является предположением об отсутствии чего-либо.

Обычно, когда имеются две выборки, которые необходимо сравнить относительно среднего значения некоторой изучаемой переменной, используется t-критерий для независимых выборок. Непараметрическими альтернативами параметрического критерия для двух независимых групп являются: U-критерий Манна – Уитни (Вилкоксона) и двухвыборочный критерий Колмогорова – Смирнова.

#### 1.1. Параметрические критерии

Использование параметрических критериев статистики без предварительной проверки вида распределения может привести к определенным ошибкам в ходе проверки рабочей гипотезы [16]. Поэтому проверка на отклонение от нормального закона является частой процедурой в ходе проведения измерений, контроля и испытаний.

Существует целый ряд статистических тестов, специально разработанных для проверки нормальности распределения данных. Критерий Шапиро – Уилка считается более подходящим для небольших выборок.

После проверки генеральной совокупности на нормальность необходимо применить t-критерий. Требуется равенство дисперсий, ведь чем больше различаются между собой дисперсии и объемы выборок, тем сильнее отличается распределение вычисляемого t-критерия от распределения истинного t-критерия Стьюдента [17]. В большинстве ситуаций дисперсии и стандартные отклонения двух генеральных совокупностей неизвестны, поэтому для применения оригинального критерия Стьюдента и усиления его мощности был использован критерий Фишера.

Пусть  $x_1, \dots, x_n$  – выборка объема  $n_X$  наблюдений случайной величины  $X$  (группа здоровых пациентов), имеющей неизвестное распределе-

ние  $F_X(x)$ ;  $y_1, \dots, y_n$  – выборка объёма  $n_Y$  наблюдений случайной величины  $Y$  (группа больных), имеющей неизвестное распределение  $F_Y(y)$ . Под  $x_1, \dots, x_n$  и  $y_1, \dots, y_n$  принимаются значения светимостей пептида. Количество всех признаков (пептидов) примем за  $N$ , а число информативных признаков – за  $N_{\text{инф}}$ .

В общем виде *критерий Фишера  $F$  ( $F$ -тест)* используется для сравнения дисперсий двух генеральных нормально распределённых совокупностей, т. е. проверяется следующая гипотеза:

$$H_0 : \sigma_X^2 = \sigma_Y^2.$$

Генеральные дисперсии  $\sigma_X^2, \sigma_Y^2$  оцениваются на основе выборок и рассчитываются как отношение одной выборочной дисперсии  $s_X^2$  к дру-

гой  $s_Y^2$ : 
$$F = \frac{s_X^2}{s_Y^2}.$$

*Критерий Стьюдента  $t$* . При сравнении двух выборок проверяемая нулевая гипотеза состоит в том, что обе эти выборки происходят из нормально распределённых генеральных совокупностей с одинаковыми средними значениями:  $H_0 : \mu_X = \mu_Y$ .

Генеральные средние  $\mu_X, \mu_Y$  оцениваются при помощи выборочных средних значений, формула  $t$ -критерия приобретает вид

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_{XY} \sqrt{\frac{1}{n_X} + \frac{1}{n_Y}}}, \text{ где } S_{XY} = \sqrt{\frac{(n_X - 1)S_X^2 + (n_Y - 1)S_Y^2}{n_X + n_Y - 2}}.$$

## 1.2. Непараметрические критерии

*Критерий Манна – Уитни (Вилкоксона)* проверяет гипотезу о статистической однородности двух выборок. Выборки  $x_1, \dots, x_n$  и  $y_1, \dots, y_n$  называются однородными, если  $F_X(\xi) = F_Y(\xi)$ , где  $\xi$  – случайная непрерывная величина. Иными словами, выборки считаются однородными, если они получены из одной и той же генеральной совокупности, или являются наблюдениями одной и той же случайной величины.

Таким образом, требуется подтверждение  $H_0$  :

$$H_0 : F_X(\xi) = F_Y(\xi); H_1 : F_X(\xi) < F_Y(\xi).$$

Критерий Манна – Уитни основан на результате попарного сравнения элементов первой и второй выборок [18]

$$U = \sum_{i,j} I(x_i < y_j).$$

Здесь индикатор  $I$  обозначает «успех» (и равен 1) в случае, если  $x_i < y_j$ .

Число успехов в этих парных сравнениях обозначим через  $U$ . Полученное значение сравнивается с критическим  $U_{кр}$  для заданного уровня значимости  $\alpha$ . Действуя по стандартному алгоритму проверки гипотез,  $H_1$  отклоняется на уровне значимости  $\alpha$ , если  $|U| > U_{кр}$ .

*Двухвыборочный критерий Колмогорова – Смирнова.* Позволяет найти точку, в которой сумма накопленных частот расхождений между двумя распределениями является наибольшей, и оценить достоверность этого расхождения. Нулевая гипотеза  $H_0 = \{\text{различия между двумя распределениями недостоверны}\}$ .

В критерии Колмогорова используется статистика критерия

$$Z_{n_X n_Y} = \sqrt{\frac{n_X n_Y}{n_X + n_Y}} D_{n_X n_Y},$$

где  $D_{n_X n_Y}$  – расстояние по Колмогорову между эмпирическими функциями распределения  $F_{n_X}^*(\xi)$  и  $G_{n_Y}^*(\xi)$  случайных величин  $X$  и  $Y$  соответственно. Основная гипотеза  $H_0$  должна отклоняться в области больших значений  $Z_{n_X n_Y}$ , т. е. критическая область должна выбираться правосторонней.

## 2. Экспериментальные исследования

В данной работе были приняты следующие обозначения: гипотеза  $H_0$  – отсутствие различий между выборками,  $H_1$  – альтернативная гипотеза; результаты статистического анализа считались значимыми при  $p < 10^{-7}$ . Техническим инструментом для исследования являлись многочисленные библиотеки из пакета  $R$ , которые позволяют легко обрабатывать большие данные и использовать различные статистические методы.

Основой исследования послужили данные по матрице из 10 000 пептидов –  $N$  [19]. Оцифрованные значения пептидов были получены из публичного хранилища биомедицинских данных [20].

На рис. 1 представлены расчёты параметрических критериев Фишера и Стьюдента. Ось ординат, представленная в логарифмическом виде, отображает вероятность значений  $p$ , ось абсцисс – количество отображенных информативных признаков.

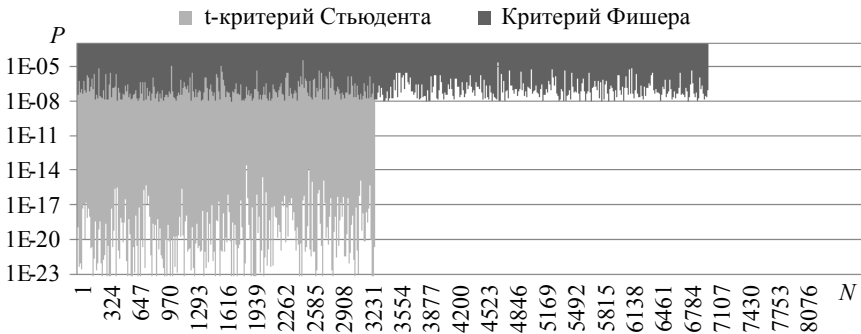


Рис. 1. Применение параметрических критериев (Фишера и Стьюдента)

Результаты применения параметрических критериев отображены на рис. 2. На графике наглядно показано, что критерий Колмогорова выбирает меньшее количество информативных данных.

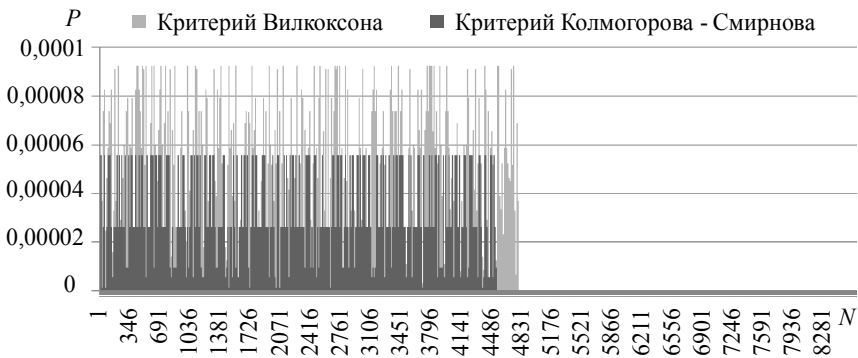


Рис. 2. Применение непараметрических критериев (Колмогорова и Вилкоксона)

Для того чтобы адекватно оценить репрезентативность выборки, данные от разных критериев были протестированы на различных классификаторах: методе опорных векторов, случайных деревьях, сверточной нейронной сети, многослойном персептроне [21]. Высокую точность показали все классификаторы, но при этом общее количество информативных признаков, полученных с помощью различных методов, очень сильно варьировалось. Информативность выборки сохранялась и при меньшем количестве отобранных признаков, однако это было справедливо не для всех классификаторов. Оказалось, что нейросетевым методом проще классифицировать данные высокой размерности, нежели низкой. Поэтому самым надежным способом повышения информативности явился отбор признаков, где выполнялись сразу четыре статистических критерия. Проверка данных на различных классификаторах показала высокую точность, но при этом количество отобранных информативных признаков было уменьшено.

### Выводы

Используя метод пересечения различных критериев, мы получаем выборку, по которой можно судить о генеральной совокупности в целом, тем самым значительно сокращая выборочное пространство  $N_{\text{инф}} \ll N$ , не влияя при этом на точность и надежность дальнейших вычислений. Указанный метод предлагает универсальный подход к обработке данных, который в дальнейшем можно применять не только для матриц из 10000 значений, но и для данных большей размерности. Конечно, возникают некие трудности при определении мультиклассовых признаков. Применение статистических вычислений в таком случае можно выполнять лишь парным перебором – каждая болезнь с контрольной группой, что является рутинной работой и не всегда обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Однако решение задачи кластеризации при мультиклассовой диагностике находится в разработке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stafford P. et al.* Physical characterization of the «immunosignaturing effect». – *Mol Cell Proteomics*, 2012
2. *Шаповал А.И., Легутки Д.Б., Стаффорд Ф., Требухов А.В., Джонстон С.А., Шойхент Я.Н., Лазарев А.Ф.* Иммуносигнатура – пептидный микроэрей для диагностики рака и других заболеваний // *Российский онкологический журнал*. – 2014. – № 4. – Т. 19. – С. 11.

3. Григорьев Ф.Н., Гуляев Ю.В., Дворникова С.Н. и др. Задача распознавания образов для диагностики сердечнососудистых заболеваний по данным ЭКГ // Информационные процессы. – 2014. – Т. 14. – № 2. – 178 с.
4. Дмитриев А.И., Журавлев Ю.И., Кренделев Ф.П. О математических принципах классификации предметов или явлений // Дискретный анализ. – Новосибирск: ИМ СО АН СССР, 1966. – С. 1–17.
5. Дюкова Е.В., Песков Н.В. Построение распознающих процедур на базе элементарных классификаторов [Электронный ресурс]. – URL: [www.ccas.ru/frc/papers/djukova05construction.pdf](http://www.ccas.ru/frc/papers/djukova05construction.pdf).
6. Миркин Б.Г. Анализ качественных признаков и структур. – М.: Статистика, 1980.
7. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. – 270 с.
8. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
9. Воронцов К.В. Лекции по методам оценивания и выбора моделей. – 2007. – URL: [www.ccas.ru/voron/download/Modeling.pdf](http://www.ccas.ru/voron/download/Modeling.pdf).
10. Meshalkin L.D. Some mathematical methods for the study of noncommunicable diseases // Proc. 6-th Intern. Meeting of Uses of Epidemiol. in Planning Health Services. Yugoslavia, Primosten, 1971. – V. 1. – P. 250–256.
11. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can reasonably be supposed to have arisen from random sampling // Phil. Mag. – 1900. – V. 50. – P. 157–175.
12. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 2001. – 396 с.
13. Колесникова С.И., Янковская А.Е. Статистический подход к оцениванию зависимых признаков в интеллектуальных системах // Математические методы распознавания образов: Сб. докл. 13-й Всерос. конф. Ленинградская обл., г. Зеленогорск, 30 сентября–6 октября 2007 г. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 143–146.
14. Орлов А.И. Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях. – М.: Наука, 1985. – С. 58–92.
15. Кочетов А.Г., Лянг О.В., Масенко В.П. и др. Методические рекомендации для ординаторов и аспирантов медицинских учебных заведений, научных работников сост. – М.: РКНПК, 2012.
16. Компьютерные технологии в науке, образовании и профессиональной деятельности. Анализ двух выборок [Электронный ресурс]. – URL: <https://sites.google.com/site/ktnoscience/Home/lecture/l6> (дата обращения: 15.05.17)
17. StudFiles [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/1564646/page:5>(дата обращения: 15.05.17)
18. Корнеев А.А., Кричевец А.Н. Условия применимости критериев Стьюдента и Манна – Уитни // Психологический журнал. – 2011. – Т. 32. – № 1. – С. 97–110.
19. Brian O'Donnell, Alexander Maurer, Antonia Papandreou-Suppappola, and Phillip Stafford. Time-Frequency Analysis of Peptide Microarray Data: Application to Brain Cancer Immunosignatures.
20. Gene Expression Omnibus [Электронный ресурс]. – URL: [www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/) (дата обращения: 16.05.17)
21. Андриющенко В.С., Перец Е.Ю., Лялюхова И.Е. Классификация иммуносигнатурных данных для задач ранней диагностики опасных заболеваний. – 2017.



# КОНТЕКСТНЫЙ ПОИСК ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ\*

*С.А. Ляшева, М.П. Шлеймович*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Значительную роль при обнаружении и идентификации динамических объектов в системах машинного зрения играют методы и средства поиска изображений.

Наиболее эффективны по соотношению точности и времени системы контекстного поиска изображений, в которых запросом является некоторое изображение или набор характеристик и требуется найти в заданной базе изображений (коллекции) изображения, максимально похожие на запрос в соответствии с выбранной мерой сходства.

Для вычисления сходства изображений на основе выбранной меры применяются различные геометрические и статистические подходы. Например, может быть использовано корреляционное сопоставление или евклидово расстояние. Также используются методы машинного обучения.

В настоящее время разработано большое количество систем контекстного поиска, имеющих различные архитектуры. Независимо от конкретной архитектуры, они включают базу изображений; подсистему извлечения низкоуровневых признаков изображений; базу визуальных признаков; подсистему индексации изображений; интерфейс пользователя; дополнительные подсистемы, например, автоматической аннотации и индексации изображений, определения сходства изображений, соответствующие человеческому восприятию [1].

Эффективная организация поиска изображений в системах машинного зрения при обнаружении и идентификации динамических объектов позволяет повысить точность управляющих решений и сократить время на их формирование. В таких системах в общем случае необходимо обеспечить выполнение процедур получения, преобразования, выделе-

---

\* Исследование выполнено в рамках госзадания № 2.1724.2017/4.6.

ния признаков и анализа признаков изображений. При реализации указанных процедур необходимо выбрать модели представления изображений на базе некоторых признаковых описаний, оптимальных согласно определенным критериям. Например, для бортовых систем беспилотных летательных аппаратов часто требуется обеспечить обработку информации значительных объемов, содержащейся в изображениях, в условиях реального времени и ограниченных вычислительных ресурсов.

Таким образом, актуальна задача разработки признаковых моделей представления изображений, оптимальных с точки зрения организации контекстного поиска в системах обработки информации и управления, основанных на технологиях машинного зрения.

### **Признаковые описания изображений**

При проектировании процедур анализа изображений принято рассматривать модели низкого, среднего и высокого уровней представления изображений [2].

На низком уровне для представления изображений часто используют функциональные модели, вероятностные модели и иерархические модели. Примером функциональной модели изображения является его описание в виде функции пространственных координат. Вероятностные модели описывают изображения в виде реализаций случайных процессов на основе функций плотности. Иерархические модели представляют изображения в виде множеств изображений различных масштабов.

На среднем уровне для представления изображений используют описания их характерных особенностей. Здесь широко применяются контурные модели, модели областей интереса, модели точек интереса, модели структурных элементов. Формирование модели в данном случае осуществляется в два этапа – сначала выполняется сегментация изображения, а затем делается его описание в виде векторов признаков, характеризующих отдельные сегменты.

Высокий уровень представления изображений базируется на моделях явного и неявного использования знаний. Примером модели неявного использования знаний является модель на основе шаблонных изображений. В моделях явного использования знаний применяются описания в виде правил интерпретации информации, содержащейся в изображении.

Большинство используемых на практике подходов к анализу изображений основано на применении моделей неявного использования знаний. При этом описание изображений базируется на признаках цвета, текстуры, формы и структуры [3].

Признаки цвета позволяют сравнить цветовое содержание изображений. Например, можно указать требования к процентному содержанию цветов из заданного набора в искомым изображениях в целом или в определенных областях. Часто применяются гистограмма цветов [4], вектор цветовой связности [5], коррелограмма цветов [6], цветовые моменты [7], дескриптор доминантного цвета [8].

Признаки текстуры определяют пространственное распределение цветов (или яркости) изображений. При этом сходство текстур двух изображений не означает совпадения значений их цветов (или яркости). В качестве текстурных признаков, например, применяются статистические текстурные признаки [3], локальные бинарные шаблоны [9], спектральные признаки [10], признаки Тамуры [11].

В отличие от цветовых и текстурных признаков, которые могут относиться к изображению целиком, признаки формы относятся к областям изображения. К данным признакам относятся, например, округлость области, ее прямоугольность, периметр, площадь, ориентация главных осей [3, 12].

Признаки структуры позволяют учесть семантику искомым изображений. К ним относятся данные результатов обнаружения конкретных объектов на изображениях и их взаимного расположения [3].

### Анализ изображений на основе вейвлет-преобразования

В настоящее время для анализа изображений часто используются методы, основанные на вейвлет-преобразованиях, которые в общем виде представляются следующим образом:

$$Wf(\mathbf{u}, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{x}) \frac{1}{s^{D/2}} \psi\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{u}}{s}\right) d\mathbf{x}, \quad (1)$$

где  $Wf$  – результат преобразования;  $f$  – исходная функция;  $\psi^*$  – комплексное сопряжение сдвинутой и масштабированной функции  $\psi$ , которая имеет нулевое среднее значение, центр в нулевой точке и единичную норму;  $D$  – размерность сигнала;  $\mathbf{u}$  –  $D$ -мерный вектор параметров сдвига;  $s$  – параметр масштаба [13, 14]. Вейвлет-преобразование рас-

кладывает сигнал по базисным функциям  $\Psi_{u,s}(\mathbf{x}) = \frac{1}{s^{D/2}} \Psi\left(\frac{\mathbf{x}-\mathbf{u}}{s}\right)$ , которые позволяют выявить его особенности в локальной области (определяется параметрами сдвига) при некотором масштабе (определяется параметром масштаба). Для изображений  $D = 2$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T$ ,  $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ .

Вейвлет-преобразования в виде выражения (1) являются непрерывными. На их основе строятся различные эффективные признаковые описания изображений, например контурные и текстурные [13, 15, 16]. Однако на практике их применение подразумевает приближенный характер результатов и относительно медленные процедуры вычислений. Для конечных дискретных сигналов, к которым относятся цифровые изображения, можно применить дискретные ортогональные кратномасштабные вейвлет-преобразования, в основе которых лежит представление дискретной функции  $f(\mathbf{x})$ , описывающей сигнал в виде суммы

$$f(\mathbf{x}) = f_a(\mathbf{x}) + f_d(\mathbf{x}), \quad (2)$$

аппроксимирующей  $f_a(\mathbf{x})$  и детализирующей  $f_d(\mathbf{x})$  составляющих. Процесс преобразования функции  $f(\mathbf{x})$  также можно представить в итерационном виде, определяющем ее на разных уровнях разложения:

$$J = \log_2 N; \quad (3)$$

$$f(\mathbf{x}) = f_a^J(\mathbf{x}); \quad (4)$$

$$f_a^j(\mathbf{x}) = f_a^{j-1}(\mathbf{x}) + f_d^{j-1}(\mathbf{x}), \quad (5)$$

где  $N$  – число значений дискретной функции  $f(\mathbf{x})$ ;  $J$  – число уровней разложения;  $j = J, \dots, j_0 + 1$ . Результат дискретного вейвлет-преобразования имеет вид множества коэффициентов аппроксимации и детализации.

При выполнении вейвлет-преобразования изображений обычно применяют разделимые преобразования, которые выполняются в два этапа: сначала выполняется преобразование для строк, а затем – для столбцов, либо наоборот. Результаты преобразования на  $j$ -м уровне группируются в матрицу аппроксимирующих коэффициентов  $\left[LL_{j,m,n}\right]_{m,n=0}^{2^j-1}$  и матрицы детализирующих горизонтальных  $\left[LH_{j,m,n}\right]_{m,n=0}^{2^j-1}$ , вертикальных  $\left[HL_{j,m,n}\right]_{m,n=0}^{2^j-1}$ , диагональных  $\left[HH_{j,m,n}\right]_{m,n=0}^{2^j-1}$  коэффициентов. Отметим,

что здесь и далее описывается преобразование для одноканальных изображений. Для многоканальных изображений (например, цветных изображений) каждый канал подвергается указанному преобразованию по отдельности.

### Энергетические признаки вейвлет-преобразования

Для анализа изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования эффективно применение признакового описания, построенного на основе коэффициентов детализации различных уровней [17]. Устойчивое к шуму представление изображений можно получить на основе энергетических признаков. Для одномерного дискретного вейвлет-преобразования с ортонормированными базисными функциями и дискретного сигнала  $\{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$  справедливо равенство

$$\sum_{k=0}^{N-1} f_k^2 = \sum_{l=0}^{2^{j_0}-1} a_{j_0,l}^2 + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{l=0}^{2^j-1} d_{j,l}^2, \quad (6)$$

представляющее собой аналог известного равенства Парсеваля. В случае изображений это равенство принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} f_{k,l}^2 &= \sum_{m=0}^{2^{j_0}-1} \sum_{n=0}^{2^{j_0}-1} LL_{j_0,m,n}^2 + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} LH_{j,m,n}^2 + \\ &+ \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} HL_{j,m,n}^2 + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} HH_{j,m,n}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где изображение представляет собой квадратную матрицу  $[f_{k,l}]_{k,l=0}^{N-1}$ , размер которой есть степень 2, а результаты преобразования на  $j$ -м уровне группируются в матрицу аппроксимирующих коэффициентов  $[LL_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$  и матрицы детализирующих горизонтальных  $[LH_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$ , вертикальных  $[HL_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$ , диагональных  $[HH_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$  коэффициентов.

На основе равенства (7) можно получить оценки энергии для каждой точки изображения посредством выполнения следующего алгоритма:

1. Выполнить преобразование до уровня  $j_0$ .

2. Положить:

$$w_{j_0-1,m,n}^2 = LL_{j_0,m,n}^2. \quad (8)$$

3. Последовательно для  $j = j_0, \dots, J-1$ , где  $J = \log_2 N$ ,  $m = 0, 1, \dots, 2^{j+1}-1$ ,  $n = 0, 1, \dots, 2^{j+1}-1$  вычислить оценки энергии:

$$w_{j,m,n}^2 = \frac{1}{4} w_{j-1,m,n}^2 + LH_{j,m/2,n/2}^2 + HL_{j,m/2,n/2}^2 + HH_{j,m/2,n/2}^2. \quad (9)$$

Вычисленные значения сохраняют энергетическое равенство:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} f_{k,l}^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} w_{k,l}^2, \quad (10)$$

где

$$w_{k,l}^2 = w_{j-1,k,l}^2. \quad (11)$$

Каждое из множества значений  $\{w_{k,l}^2\}_{k,l=0}^{N-1}$  или  $\{w_{k,l}\}_{k,l=0}^{N-1}$  может служить весом соответствующей точки, характеризующим ее вклад в полную энергию изображения.

Значения нормировочных коэффициентов можно считать настроечными параметрами, специфичными для конкретной задачи. Тогда алгоритм вычисления энергетических признаков можно обобщить следующим образом:

1) изменить выражения (8):

$$w_{j_0-1,m,n}^2 = K_{j_0-1} LL_{j_0,m,n}^2; \quad (12)$$

2) изменить выражения (9):

$$w_{j,m,n}^2 = \frac{1}{4} w_{j-1,m,n}^2 + K_j [LH_{j,m/2,n/2}^2 + HL_{j,m/2,n/2}^2 + HH_{j,m/2,n/2}^2]. \quad (13)$$

В результате описанного подхода можно получить изображения, где вместо интенсивностей с пикселями будут ассоциированы их энергетические веса.

Значения данных весов является более устойчивым к шуму по сравнению с признаками, вычисленными для исходных значений пикселей. Таким образом, можно получить устойчивые модели представления изображений для их сопоставления при организации контекстного поиска в условиях функционирования реальных систем, основанных на технологиях машинного зрения [18].

### Заключение

Описанный подход может служить основой для построения моделей представления изображений в системах контекстного поиска. Кроме того, на основе данного подхода могут быть реализованы эффективные методы сопоставления изображений на основе детекторов и дескрипторов особых вейвлет-преобразования. Например, он был применен для поиска и идентификации объектов на изображениях, полученных в бортовой системе беспилотного летательного аппарата [19].

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Левашикина А.О.* Разработка методов поиска изображений на основе вычислительных моделей визуального внимания: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 166 с.
2. *Потапов А.С.* Распознавание образов и машинное восприятие: общий подход на основе принципа минимальной длины описания. – СПб.: Политехника, 2007. – 548 с.
3. *Шаниро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение: пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
4. *Long F., Zhang H., and Feng D.* Fundamentals of content-based image retrieval // *Multimedia Information Retrieval and Management – Technological Fundamentals and Applications.* – Springer Verlag, 2003. – P. 1–26.
5. *Pass G. and Zabih R.* Histogram refinement for content-based image retrieval // *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision.* – 1996. – P. 96–102.
6. *Huang J., Kumar S.R., Mitra M., et al.* Spatial Color Indexing and Applications // *Int. J. Computer Vision.* – 1999. – V. 35(3). – P. 245–268.
7. *Stricker M. and Orengo M.* Similarity of Color Images // *Proceedings of the SPIE Conf.* – 1995. – V. 2420. – P. 381–392.
8. *Deng Y., Manjunath B.S., Kenney Ch., et al.* An efficient color representation for image retrieval // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 2001. – V. 10. – No. 1. – P. 140–147.
9. *Pietikinen M., Pietikinen M., Hadid A., et al.* *Computer Vision Using Local Binary Patterns.* – Springer, 2011.
10. *Tuceryan M. and Jain A.K.* Texture analysis // *The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2nd edition)* / eds. C. Chen, L.F. Pau, P.S.P. Wang. – World Scientific Publishing Co., 1998. – P. 207–248.
11. *Tamura H., Mori S., and Yamawaki T.* Texture features corresponding to visual perception // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.* – 1978. – V. SMC-8. – No. 6. – P. 460–473.
12. *Image Databases: Search and Retrieval of Digital Imagery* / eds. V. Castelli, L.D. Bergman. – New York: Wiley, 2002.
13. *Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

14. *Addison P.S.* The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. – Institute of Physics Publishing, 2002.
15. *Ma W.Y. and Manjunath B.S.* A comparison of wavelet features for texture annotation // Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Processing. – 1995. – V. II. – P. 256–259.
16. *Tang Y.Y.* Wavelet Theory and Its Application to Pattern Recognition. – World Scientific Publishing Company, 2009.
17. *Sebe N. and Lew M.S.* Robust Computer Vision – Theory and Applications. – Kluwer Academic Publishers, 2003.
18. *Шлеймович М.П., Ляшева С.А.* Сопоставление изображений с использованием энергетических признаков на основе вейвлет-преобразования // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2016): труды Междунар. науч.-технич. конф. / под ред. С.А. Прохорова. – Самара, 2016. – С. 400–403.
19. *Lyasheva S.A., Medvedev M.V., and Shleimovich M.P.* Terrain Object Recognition in Unmanned Aerial Vehicle Control System // Russian Aeronautics. – 2014. – V. 57. – No. 3. – P. 303–306.



# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*С.А. Ляшева, М.П. Шлеймович*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные относительно быстропротекающих процессов позволяют установить и обосновать многие закономерности в данной области, связанные с такими параметрами, как энтальпия, фугасность, бризантность, скорость детонации, скорость взрыва и т.д.

Одним из наиболее важных параметров быстропротекающих процессов является фугасность, характеризующая фугасное действие. Фугасное действие проявляется в форме раскалывания и отбрасывания среды, в которой происходит взрыв. Очень часто фугасность называют работоспособностью взрывчатого вещества. Оценивают этот параметр условными характеристиками, определяемыми по результатам проведения экспериментов. Ранее при теоретическом исследовании полную работу взрыва рассматривали как работу адиабатного расширения продуктов взрыва. При этом величину практической работоспособности считали пропорционально работе адиабатного расширения продуктов взрыва при определенной степени этого расширения, зависящей от условий взрыва и характера производимой работы. Определить работоспособности по этому принципу можно с помощью баллистического маятника. Однако практическое использование метода баллистического маятника для определения работоспособности взрывчатого вещества требует преодоления многих трудностей. Поэтому в промышленности для оценки работоспособности наибольшее распространение имеет метод, при котором изменяется расширение, образуемое взрывом в свинцовой бомбе.

Еще одним из важных параметров является скорость детонации. Для ее анализа часто используют расчетные методы. Например, существует достаточное количество методов приближенного расчета скорости детонации C–H–O–N-взрывчатых веществ, основывающихся на экспериментальных данных. Анализ шести экспресс-методов, проведенный Трубини-

ковым и Козыревым, показал, что наиболее эффективным относительно всех взрывчатых веществ является метод Айзенштадта. Погрешности вычислений, получаемые в результате применения методов Ву Ксионга и Камлета, имеют примерно одинаковые значения. Эти методы наиболее эффективны применительно к взрывчатым веществам с отрицательным кислородным балансом. Метод Кривченко также позволяет получить относительно невысокую погрешность для взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом, но его применение осложняется тем, что для расчета требуется знание величины скорости звука в этих взрывчатых веществах. Метод Пепекина целесообразно применять для расчета скорости детонации со строго отрицательным кислородным балансом. Наибольшую погрешность вычислений для всех взрывчатых веществ дает экспресс метод Ротштейна, являющийся при этом и самым сложным, что позволяет его считать наименее эффективным.

Таким образом, для определения параметров быстропротекающих процессов применяют либо эксперименты, либо приближенные методы расчета. Однако следует отметить, что, во-первых, экспериментальные исследования требуют немалых материальных затрат, во-вторых, необходима достаточно длительная подготовка к проведению конкретного эксперимента, в-третьих, встает проблема проверки достоверности полученных данных. В то же время применяемые на практике методы расчета дают приближенные результаты со значительными погрешностями. Однако накопленный экспериментальный материал может быть использован для интеллектуального анализа быстропротекающих процессов, целью которого является определение значений требуемых параметров. Такой анализ позволит обобщить практический опыт и гибко реагировать на появление новых данных.

В работе рассматриваются результаты исследований в данном направлении с применением методов нейросетевого прогнозирования параметров быстропротекающих процессов, согласно которым получаемые значения сравнимы с расчетными значениями, вычисленными по известным методикам.

### **Прогнозирование фугасности индивидуальных взрывчатых веществ с использованием нейронной сети**

Фугасность характеризует один из основных видов внешней работы взрыва – фугасное действие, которое проявляется в форме раскалывания и отбрасывания среды, в которой происходит взрыв [1]. Фугасно-

стью называется способность взрывчатых веществ к разрушительному действию за счет расширения продуктов взрыва до сравнительно невысоких давлений и прохождения по среде ударной волны. В качестве меры фугасности в теоретических расчетах используют потенциал взрывчатого вещества или его удельную энергию. Однако фугасность и удельная энергия взрывчатого вещества не являются тождественными понятиями, поскольку кроме потенциала или удельной энергии на фугасное действие оказывают существенное влияние такие характеристики, как удельный объем и состав газообразных продуктов взрыва. Учитывая это, фугасность оценивают условными характеристиками, определяемыми по результатам проведения экспериментов.

Для практической оценки фугасности применяют пробу на расширение свинцовой бомбы. В этом случае заряд испытуемого взрывчатого вещества массой 10 г взрывают в цилиндрическом канале свинцовой бомбы определенных размеров. После взрыва канал расширяется и приобретает грушевидную форму. В качестве меры фугасности принимается изменение объема канала. Теоретическое исследование полной работы взрыва было впервые проведено русским ученым И.М. Чельцовым, а затем получило дальнейшее развитие в работах А.Ф. Беляева. Чельцов рассматривал работу взрыва как работу адиабатного расширения продуктов взрыва. По А.Ф. Беляеву, величина практической работоспособности пропорциональна работе адиабатного расширения продуктов взрыва при определенной степени этого расширения, зависящей от условий взрыва и характера производимой работы. Определить работоспособность по этому принципу можно с помощью баллистического маятника. Однако, как указывает К.К. Андреев, практическое использование метода баллистического маятника для определения работоспособности взрывчатого вещества требует преодоления многих трудностей. Поэтому в промышленности для оценки работоспособности наибольшее распространение имеет метод, при котором изменяется расширение, образуемое взрывом в свинцовой бомбе. Для этой цели применяют свинцовую бомбу с цилиндрическим гнездом. В бумажную гильзу бомбы помещают 10 г взрывчатого вещества и прессуют в специальной матрице в виде патрона с гнездом для капсюля – детонатора или электродетонатора. Патрон с капсюлем вводят в гнездо бомбы. Свободный объем гнезда засыпают кварцевым песком. При взрыве гнездо бомбы расширяется и приобретает грушевидную форму. Разность между объемом гнезда до и после взрыва является практической мерой работоспособности испытуемого взрывчатого вещества [2].

Из представленного выше описания видно, что фугасность определяют, в основном, экспериментально. Проведение эксперимента связано с обеспечением безопасности и финансовыми затратами. Очевидно, что сократить финансовые затраты и обеспечить безопасность людей при определении фугасности можно за счет проведения вычислительных экспериментов на компьютере. При этом получение даже приближительных результатов с погрешностью дает ориентацию для планирования дальнейших исследований данного параметра. Поэтому подходы, базирующиеся на компьютерном моделировании, позволяющим проводить анализ процессов и делать выводы относительно их параметров на основании расчетно-теоретических представлений, актуальны и практически значимы [3].

Одним из перспективных направлений представляется получение модели, позволяющей прогнозировать фугасность по значениям параметров взрывчатых веществ и процесса взрыва. В этом случае можно обучить систему прогнозирования с помощью обучающей выборки. Данное обучение и последующее прогнозирование можно эффективно осуществить посредством применения нейронной сети. Для построения нейросетевой модели, обучения нейронной сети и тестирования ее способности к прогнозированию была создана электронная база данных, в состав которой по результатам изучения открытых источников включены 48 индивидуальных взрывчатых веществ. В этой базе данных исходными параметрами являлись:

- количество углерода;
- количество водорода;
- количество кислорода;
- количество азота;
- молярная масса;
- кислородный баланс;
- плотность;
- объем продуктов взрыва;
- фугасность (полученная экспериментально).

В состав базы данных вошли следующие вещества:

- октоген;
- тетрил;
- гексаген;
- ЭДНА;
- нитрогуанидин;
- нитрокарбомид и др.

Для построения нейросетевой модели и прогнозирования был использован пакет прикладных программ Statistica [4], который содержит большое количество эффективных средств анализа данных. Проведенные с помощью нейронной сети эксперименты показали, что погрешность прогнозирования в среднем составляет около 30 %, что связано с отдельными значительными выбросами. Однако для большинства веществ результаты прогноза сопоставимы с экспериментальными данными.

### **Прогнозирование скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ с использованием нейронной сети**

К одним из наиболее эффективных методов определения скорости детонации взрывчатых веществ относится метод Айзенштадта [5], который заключается в использовании следующих факторов [6]:

- абсолютное значение величины кислородного баланса;
- удельная изохорическая теплота образования взрывчатого вещества;
- исходное число грамм-атомов в исходном взрывчатом веществе.

Схема расчета скорости детонации состоит из двух этапов. Целью первого этапа является вычисление величины идеальной скорости детонации при эталонной для всех взрывчатых веществ начальной плотности. Второй этап заключается в переходе от идеальной скорости детонации к скорости детонации, соответствующей рассматриваемой плотности. Для этого Айзенштадт предложил ввести величину, которая зависит от элементного состава вещества. Главными достоинствами данного метода являются простота вычислений и малое количество входных параметров. Поэтому данный метод был выбран для сравнения с результатами нейросетевого прогнозирования скорости детонации.

Примененная для прогнозирования скорости детонации взрывчатых веществ нейронная сеть представляет собой однослойный персептрон с 9 нейронами во входном слое, 7 нейронами в скрытом слое и одним нейроном в выходном слое. Входными параметрами являются:

- количество углерода;
- количество водорода;
- количество азота;
- количество кислорода;
- молярная масса;
- кислородный баланс;
- кислородный коэффициент;
- плотность;
- энтальпия.

Прогнозирование для всех веществ в базе данных было проведено методом скользящей выборки. Средняя ошибка прогнозирования составила 4,3 %. Следует также отметить, что 75 % результатов, полученных прогнозированием с помощью искусственной нейронной сети, входят в доверительный интервал, в то время как лишь 47,5 % результатов моделирования методом Айзенштадта не вышли за доверительный интервал. Это свидетельствует о состоятельности нейросетевого подхода в прогнозировании скорости детонации.

### Заключение

Таким образом, применение нейронных сетей, обученных на основе известных данных, позволяет получить ориентировочные значения для оценки параметров быстропротекающих процессов без использования дорогостоящих и опасных экспериментов [7, 8].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.
2. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960. – 594 с.
3. Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шитина О.Т. Автоматизированная система моделирования параметров быстропротекающих процессов // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КНИТУ, 2014. – Т. 17. – № 13. – С. 349–352.
4. Боровиков В.П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks. Методология и технологии современного анализа данных. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 392 с.
5. Трубников А.А., Козырев Н.В. Анализ экспресс методов расчета скорости детонации С–Н–О-конденсированных взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 121–125.
6. Айзенштадт И.Н. // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. – № 5. – С. 758–763.
7. Ляшева С.А., Шлеймович М.П., Кирпичников А.П., Спицин А.Н. Прогнозирование скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ с использованием нейронной сети // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 15. – С. 226–230.
8. Ляшева С.А., Шлеймович М.П., Кирпичников А.П., Гришина О.Д. Нейросетевое прогнозирование фугасности индивидуальных взрывчатых веществ // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 17. – С. 171–174.

# ГЕНЕРАЦИЯ СЮЖЕТОВ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТЕКСТНЫХ ФОРМАЛЬНЫХ ГРАММАТИК

*И.Д. Мухин, К.В. Карпов*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Компьютерное творчество – одна из наиболее молодых, но притом быстро развивающихся областей исследования в информационных технологиях. И неудивительно, что эти исследования до сих пор стоят перед рядом фундаментальных проблем. Творчество очень сложно, может быть, даже невозможно определить в объективных терминах. Это состояние ума, талант, способность или процесс? Творчество в большей или меньшей степени присутствует практически во всех видах человеческой деятельности, и с течением времени компьютеры так же постигают всё новые виды творчества.

В качестве предметной области предлагаемой работы рассматривается генерация текстов. На данный момент наиболее популярен алгоритм на основе цепей Маркова [2], однако, в силу его особенностей, создаваемые предложения не являются осмысленными. В данной же работе будет предложен алгоритм, использующий контекстно-свободную формальную грамматику, а также будет введён критерий осмысленности на основе правил слов.

## **1. Анализ естественного языка**

В основу алгоритма положена обработка текстов на естественном английском языке. На основе обработанных данных будет сформирована стохастическая контекстно-свободная формальная грамматика, а также словарь бинарных отношений между словами в предложении, называемых правилами слов. Основная идея заключается в том, что каждому предложению входных текстов будет сопоставлено дерево разбора, из которых в дальнейшем будут получены формальные элементы, необходимые для дальнейшей генерации.

### **1.1. Дерево разбора**

Дерево разбора – наиболее классический подход к машинному анализу предложений естественного языка. Разработанный в 1990-е годы группой SEAS (School of Engineering and Applied Science) университета

Пенсильвании, он стал революцией в обработке естественного языка и до сих пор пользуется большой популярностью. Каждое слово, сочетание слов и даже целое предложение может быть помечено одним из тегов, раскрывающим их семантическую роль или, в случае предложений, их внутреннюю структуру и эмоциональный окрас. Всего на данный момент в спецификации предложено более тридцати тегов [1] для различных уровней дерева разбора.

Данная структура представляет собой нисходящий разбор структуры предложения. Конкретный пример дерева разбора представлен на рис. 1. Для получения данного дерева в работе используется Stanford NLP Parser [4].

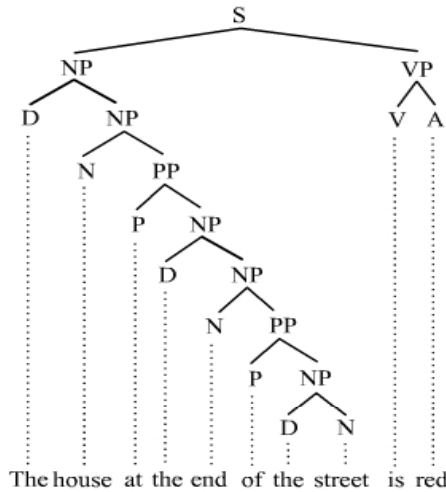


Рис. 1. Пример дерева разбора предложения

## 1.2. Контекстно-свободная грамматика

Формальная грамматика – способ представления формального языка. Формальная порождающая грамматика представляет собой четвёрку объектов:

- $\Sigma$  – набор терминальных символов.
- $\bar{N}$  – набор нетерминальных символов.
- $P$  – набор правил вида: «левая часть»  $\rightarrow$  «правая часть».
- $S$  – стартовый (или начальный) символ грамматики из набора нетерминалов.



Контекстно-свободной грамматикой называется грамматика, левая часть правил вывода которой состоит из одного нетерминала. Дерево разбора с одним тегом в каждой вершине удовлетворяет этому правилу, поэтому можно считать теги нетерминалами, а слова и знаки препинания в предложении рассматривать как терминальные символы. Левая часть правил вывода представляет собой вершину дерева, а правая – последовательность её потомков, полученную в ходе левого обхода дерева в ширину. Начальным символом грамматики является предложение. Таким образом, благодаря дереву разбора, можно построить формальную грамматику предложения.

Разбирая все предложения исходных текстов, можно выявить частоту встречаемости того или иного правила вывода, а затем использовать эти данные при генерации.

К сожалению, используемый парсер работает лишь на уровне предложений, то есть с его помощью нельзя определить взаимосвязь между предложениями и абзацами в тексте, не говоря уже о выделении актов в художественном произведении. Таким образом, необходимо дополнить грамматику базовыми правилами: вывод текста в последовательность из пяти актов (экспозиция, завязка, кульминация, развязка, постпозиция), а также вывод каждого акта в некоторые последовательности предложений разных типов. Данные правила являются полноценными правилами вывода и для них так же вычисляются вероятностные коэффициенты. Деление исходных текстов на акты на данный момент не подлежит автоматизации и осуществляется вручную.

### 1.3. Правила слов

В дополнение к классическому определению бесконтекстной грамматики предлагается ввести понятие правил слов – правил, определяющих, какие связи то или иное слово может образовывать в предложении. Такие правила могут быть лево- или правосторонними, в зависимости от того, далее либо ранее по тексту находится слово, образующее пару для данной связи.

Каждое слово может иметь несколько наборов, состоящих из одного или более правил. Правила в наборе соответствуют одновременно образованным связям слова в одном предложении, а разные наборы – связям, образуемым одним и тем же словом, употреблённым в разных предложениях.

В качестве типов связей предлагается использовать типизированные зависимости [3], предоставляемые Stanford NLP Parser. Таким образом, правила слов из примера на рис. 1 будут иметь следующий вид:

```
The: det+
house: det- &nsubj+ &nmod:at+
at: case+
the: det+ | det+
end: case- &det- &nmod:of+
of: case+
street: case- &det- &nmod:of-
is: cop+
red: nsubj- &nmod:at- & cop-
```

Полностью дублирующиеся правила со знаком | (логическое «или»), как в случае с правилами для слова «the», могут быть удалены.

#### 1.4. Критерий осмысленности текста

Для проверки осмысленности текста предлагается использовать правила слов. Обоснованием данного подхода является факт, что в исходном тексте все правила слов удовлетворены, а в случае исключения какого-либо слова из исходных предложений оно потенциально может потерять осмысленность. Стоит заметить, что данное правило является верным лишь в том случае, если все тексты, используемые для обучения, являлись осмысленными.

Таким образом, каждому предложению соответствует множество правил для используемых в нём слов. Предполагается, что предложение является осмысленным в том случае, когда все правила из данного множества удовлетворены. Чем более объёмной и разнообразной была выборка для обучения, тем больше вариантов сочетаний известно системе. Также можно заметить, что правила слов обеспечивают не только семантическую, но и грамматическую корректность употребления слов, что также важно для осмысленности результирующего текста.

## 2. Генерация осмысленных текстов

При достаточно большой выборке полученные правила вывода можно привести к леворекурсивному виду. В этом случае вся грамматика становится леворекурсивной. Таким образом, для вывода может быть применён алгоритм на основе нисходящего анализа. В качестве начального символа выступает текст, для которого существует единственное правило

вывода – вывод в последовательность из пяти актов. Алгоритм перебирает альтернативны для нетерминалов с учётом их вероятностей, пока не будет получена цепочка из терминальных символов, которая потенциально является осмысленным текстом. Далее, полученную цепочку следует проверить на осмысленность в соответствии с заявленным критерием. Данный алгоритм имеет точку выхода, так как гарантированно можно получить какой-либо из исходных текстов, в силу того, что вся информация об их структуре содержится в используемой грамматике.

Недостатком данного алгоритма является большое количество ошибочных шагов, совершённых вследствие того, что на промежуточных этапах невозможно оценить осмысленность генерируемых отрывков – её можно оценить лишь при полном выводе грамматически верной цепочки. Решение данной проблемы мы видим в формировании контекстно-зависимой грамматики, правила вывода которой сразу учитывают правила слов.

### 3. Результаты

Было проведено прототипирование данного алгоритма. Программа была обучена на 10 текстах из цикла «Хранители». Полученные результаты приведены на рис. 2.

```

ROOT ->S : 231
ROOT ->SINV : 5
SINV -> PP VP NP. : 5
SINV -> MD NP VP : 3
PP -> IN NP : 353
PP -> TO NP : 56
IN ->of : 102
IN ->in : 68

```

Рис. 2. Пример полученных правил вывода

Число после правила указывает на количество использований этого правила в проанализированных текстах и используется для выбора наиболее вероятной альтернативы (рис. 3).

```

Beyond : case+
it : case-& | nmod:beyond+
lies : nmod:beyond-& | root-& | nsubj+
a : det+ | advmod-& | nmod:for-& | dep+
cozy : amod+
room : det-& | amod-& | nsubj-& | acl+
filled : acl-& | nmod:with+

```

Рис. 3. Пример полученных правил для слов

Фрагмент полученного текста: «Barely rammed my tall wail expression failures evoke lovely, lamentable power, yet walking aside, amazingly as stoically my massive, trapped language hands when to many interior and, before worse, those bolt' a look meant some soft indifference. Watched and destroyed into able, concubine, small while anyone give through there with to her awash visions and screams word question continue but until many to their words».

Все правила слов для данного текста удовлетворены, однако можно увидеть, что с точки зрения человека данный текст не является осмысленным. Это вызвано слабой связностью предложений друг с другом, что обусловлено отсутствием метода установления связей между предложениями в исходных текстах. Соответственно данная информация отсутствует и в правилах вывода для предложений.

### Заключение

Предложенный алгоритм продемонстрировал способность создавать тексты, каждое предложение которых всегда удовлетворяет заявленному критерию осмысленности, в отличие от текстов, создаваемых упомянутым ранее алгоритмом на основе марковских цепей. При этом, однако, для человека очевидно, что весь текст не является осмысленным ввиду слабой связи предложений между собой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Santorini B.* Part-of-Speech Tagging Guidelines for the Penn Treebank Project. – 1995. – 34 p.
2. *Генератор* текста на основе Марковских цепей – LogLoss [Электронный ресурс]. – URL: <http://logloss.ru/markov-text-generator/> (дата обращения: 20.06.2017).
3. *Stanford Dependencies* [Электронный ресурс]. – URL: <https://nlp.stanford.edu/software/stanford-dependencies.shtml> (дата обращения: 20.06.2017)
4. *The Stanford Parser: A statistical parser* [Электронный ресурс]. – URL: <https://nlp.stanford.edu/software/lex-parser.html> (дата обращения: 20.06.2017).

# АНАЛИЗ ИНВАРИАНТНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Е.В. Пестов*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В автоматизированном производстве и добыче используются сенсоры для измерения температуры, давления и других технологических параметров, генерирующие сигнал [1, 2]. Эти сигналы имеют различный характер и различную зашумленность. Как правило, сигнал имеет инвариант во времени: постоянный период, постоянное среднее, ограничение сверху, ограничение снизу и тому подобное [3].

Интерес вызывают исключительные ситуации, такие, как поломка сенсора или изменения в технологическом процессе, так как они требуют вмешательства автоматики или оператора. Большинство исключительных ситуаций отражаются на сигналах и нарушают их инвариантность. Например, при поломке манометра график его сигнала может стать более гладким, но при этом сохранить период и среднее [4, 5].

Приближенное определение момента времени, в который сигнал потерял инвариантность, позволило бы уведомить оператора о возникновении исключительной ситуации.

Было решено множество аналогичных задач анализа сигналов в области медицины. К примеру, задачи анализа электрокардиографических (ЭКГ) сигналов решались методами обработки сигналов, такими, как:

- преобразование элементарных волн или вейвлет-преобразование [6–11];

- преобразование Гильберта [10, 12];
- преобразование Фурье [10, 13] и т.д.

Также задачи анализа ЭКГ решались методами машинного обучения:

- нейронные сети [11, 14–17];
- метод опорных векторов [18–22];
- k-ближайших соседей [6, 20, 23];
- деревья решений [6, 20];
- байесовское решение [24];
- линейный дискриминантный анализ [12, 18] и т.д.

### Постановка задачи

Для передачи сигналов в промышленных сетях используется спецификация OPC UA [1, 2]. Исторический срез сигнала передаётся в виде файла в формате XML [25] (листинг 1), согласно спецификации OPC UA HDA [26]. Поток значений сигнала в режиме реального времени передаётся согласно спецификации OPC UA DA.

Приложение получает на вход исторический срез сигнала (листинг 1), а также в режиме реального времени получает на вход поток значений сигнала. Требуется в режиме реального времени измерять степень схожести последнего фрагмента сигнала с историческим срезом сигнала.

Листинг 1

#### Общий вид XML-файла с историей сигнала, соответствующего спецификации OPC UA HDA [26]

```
<xml>
  <WISEPAKET ...>
    <FIELDS id = "100">
      <FIELD attrname = "F0" comment = "ID узла" ... />
      <FIELD attrname = "F1" comment = "Время измерения" ... />
      <FIELD attrname = "F2" comment = "Качество сигнала" ... />
      <FIELD attrname = "F3" comment = "Значение сигнала" ... />
    </FIELDS>
    <ROWDATA>
      <R><D F0 = "0" F1 = "42582.7083052314847" F2 = "192"
      F3 = "292"/></R>
      <R><D F0 = "0" F1 = "42582.7083054101232" F2 = "192"
      F3 = "285"/></R>
      ...
    </ROWDATA>
  </WISEPAKET>
  <ADVANCEDTEXT ...>...</ADVANCEDTEXT>
  <PROCESSING ...>...</PROCESSING>
  <TEXT ...>...</TEXT>
</xml>
```

#### Предлагаемый подход к решению задачи

По историческому срезу сигнала (см. листинг 1), так же как и по потоку сигнала, можно построить график функции, отражающий зависимость значения технологического параметра от времени проведения измерения. Пример такого графика представлен на рис. 1.

Для измерения степени схожести двух фрагментов сигнала агрегируются особенности характера двух фрагментов сигнала. Затем эти два агрегата сравниваются. Многослойный персептрон получает на вход вектор длины  $N$  из последовательных равномерно распределённых во времени значений сигнала и выдаёт ожидаемое следующее значение сигнала, тем самым агрегируя фрагмент в своё состояние.

Персептрон обучается на выборке, составленной из исторического среза сигнала. Далее, при получении каждого нового значения технологического параметра обученный персептрон получает на вход  $N$  последних актуальных значений сигнала, при этом он выдаёт следующее ожидаемое значение технологического параметра. Из разностей между ожидаемыми и реальными значениями сигнала составляется вектор ошибок, среднеквадратическое отклонение которого является характеристикой схожести сигналов.

Чем больше среднеквадратическое отклонение вектора ошибок, тем сильнее фрагменты сигнала отличаются друг от друга. Тот момент времени, в который приходит новое актуальное значение технологического параметра, и среднеквадратичное отклонение вектора ошибок превышает критическую отметку, является приближенным значением момента времени потери инвариантности сигналом.

### Первичные результаты экспериментов

Опробована описанная выше методика измерения степени схожести двух сигналов.

Для этого реализован скрипт, преобразующий данные из XML-файла, соответствующие спецификации OPC UA HDA, в обучающую и тестовую выборки в формате, совместимом с нейронной сетью, конкретно с библиотекой NeuroLab [27] для Python3 [28].

Также реализован многослойный персептрон прямого распространения со слоями:

1. Входной слой с  $N$  нейронами.
2. Скрытый слой со 100 нейронами.
3. Выходной слой с 1 нейроном.

Здесь  $N$  – варьируемое в различных экспериментах количество обрабатываемых значений сигнала. Также варьируется размер временного промежутка между двумя обрабатываемыми сигналами, обозначенный  $M$ .

Все эксперименты проводились на двух фрагментах сигнала датчика давления в резервуаре для взрывчатой эмульсии в смесительно-зарядной машине, идущих подряд, длительностью по 100 секунд (рис. 1).

Нейронная сеть с данной конфигурацией тестировалась с различными значениями варьируемого параметра  $N = 1, 2, 3, 4, 8, 16, 32$ . Для каждого значения  $N$  нейронная сеть обучалась и тестировалась 10 раз. Результатом каждого теста является среднеквадратичное отклонение предсказания от действительного сигнала на всей тестовой выборке (рис. 2). Оценкой качества работы сети при заданном значении  $N$  является среднее арифметическое из десяти результатов тестов.

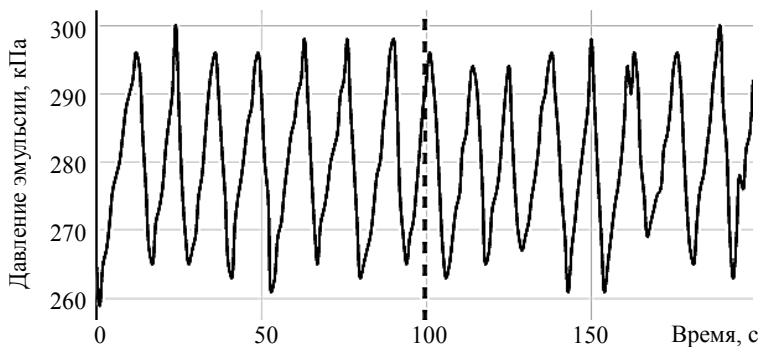


Рис. 1. Два похожих фрагмента сигнала от датчика давления в эмульсионном резервуаре смесительно-зарядной машины. Слева от пунктира – обучающая выборка, справа – тестовая

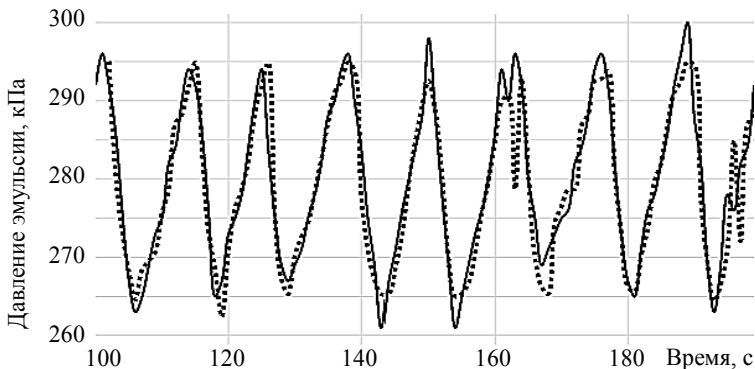


Рис. 2. Текущий сигнал.  $N = 2, M = 1$



Среди  $N = 2, 4, 8, 16, 32$  наилучшее качество работы было достигнуто при  $N = 2$ . С увеличением значения  $N$  наблюдалось повышение времени обучения сети, поэтому тестирование при  $N > 32$  не проведено.

Аналогичным образом тестировалась нейронная сеть с начальной конфигурацией и различными значениями  $M = 1, 2, 3, 4$ . Результаты приведены в таблице.

**Результаты экспериментов с различными значениями  $M$**

$N$	$M$	AVG	Сортированные результаты десяти независимых испытаний, кПа									
2	1	3,32	3,02	3,12	3,16	3,3	3,32	3,33	3,33	3,39	3,53	3,58
2	2	10,08	4,08	4,13	4,2	4,27	4,31	4,43	7,8	8,36	8,64	50,6
2	3	5,48	5,1	5,16	5,17	5,28	5,38	5,39	5,61	5,67	5,97	6,09
2	4	13,27	5,55	5,58	5,62	5,75	5,88	6,02	6,5	8,23	40,8	42,7

### Выводы

Решалась задача анализа инвариантности технологического сигнала с использованием многослойного персептрона прямого распространения. В ходе экспериментов на реальных данных (см. рис. 1) выявлена удачная конфигурация сети, при которой два инвариантных фрагмента сигнала имеют степень схожести в худшем случае 3,58 кПа (см. таблицу), при средней амплитуде сигнала около 40 кПа.

На имеющихся данных лучшие результаты были получены персептроном, получающим на вход два значения технологического параметра, измеренных через секунду.

Для определения момента времени потери инвариантности сигнала требуется исследовать выбор критического значения среднеквадратичного отклонения, при превышении которого можно считать, что технологический процесс изменился.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Богданов Н., Киселёва О.* OPC Unified Architecture: изменения в популярной технологии информационных обменов с точки зрения инженера // Современные технологии автоматизации. – 2010. – Т. 3. – С. 60–65.
2. *Leitner S.-H. and Mahnke W.* OPC UA – Service-oriented Architecture for Industrial Applications // Softwaretechnik-Trends. – 2006. – V. 26. – No. 4. – P. 1–6.
3. *Айфичер Э., Джервис Б.* Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.

4. *Возможные* неисправности манометров гидравлических и способы их устранения [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <http://elektroas.ru/vozmozhnye-neispravnosti-manometrov-gidravlicheskix-i-sposoby-ix-ustraneniya> (дата обращения: 01.06.2017).
5. *Причины* неисправности датчиков давления и способы их устранения [Электронный ресурс]. 2014. – URL: <http://ruaut.ru/content/boxroom/raznoe/prichiny-neispravnosti-datchikov-davleniya-i-sposoby-ikh-ustraneniya.html>.
6. *Гвозденко С.В. и др.* Интеллектуальный анализ сложных нестационарных сигналов на примере электрокардиографических сигналов // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – Т. 11. – № 3. – С. 537–542.
7. *Mjahad A. et al.* Ventricular Fibrillation and Tachycardia detection from surface ECG using time-frequency representation images as input dataset for machine learning // *Comput. Methods Programs Biomed.* – 2017. – V. 141. – P. 119–127.
8. *Shyu L.Y., Wu Y.H., and Hu W.* Using wavelet transform and fuzzy neural network for VPC detection from the Holter ECG // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2004. – V. 51. – No. 7. – P. 1269–1273.
9. *Lim J.S.* Finding features for real-time premature ventricular contraction detection using a fuzzy neural network system // *IEEE Trans. Neural Networks.* – 2009. – V. 20. – No. 3. – P. 522–527.
10. *Ali Lilo M. et al.* Identify and Classify Vibration Signal for Steam Turbine Based on Neural Sleep Fuzzy System // *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* – 2016. – V. 12. – No. 5. – P. 589–598.
11. *Yang G.* Electrodiogram arrhythmia pattern recognition based on an improved wavelet neural network // *J. Mech. Med. Biol.* – 2013. – V. 13. – No. 1. – P. 1350018.
12. *Mohebbi M. and Ghassemian H.* Detection of atrial fibrillation episodes using SVM // *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* – 2008. – V. 2008. – P. 177–180.
13. *Othman M.A. and Safri N.M.* Characterization of Ventricular Arrhythmias Using a Semantic Mining Algorithm // *J. Mech. Med. Biol.* – 2012. – V. 12. – No. 3. – P. 1250049.
14. *Рангайян Р.М.* Анализ биометрических сигналов. Практический подход / под ред. А.П. Немирко. – М.: Физматлит, 2007. – 440 с.
15. *Луцив В.Р.* Сверточные искусственные нейронные сети глубокого обучения // *Оптический журнал*. – 2015. – Т. 82. – № 8. – С. 11–23.
16. *Güler I. and Übeyli E.D.* ECG beat classifier designed by combined neural network model // *Pattern Recognit.* – 2005. – V. 38. – No. 2. – P. 199–208.
17. *Григорьева Е.Ю., Мисюра М.А., Палиенко А.Н.* Современные глубокие свёрточные нейронные сети // *Молодой учёный*. – 2017. – Т. 4. – № 138. – С. 153–156.
18. *Cortes C. and Vapnik V.* Support-Vector Networks // *Mach. Learn.* – 1995. – V. 20. – No. 3. – P. 273–297.
19. *Park K.S. et al.* Hierarchical support vector machine based heartbeat classification using higher order statistics and hermite basis function // *2008 Computers in Cardiology*. – 2008. – P. 229–232.
20. *Li Q., Rajagopalan C., and Clifford G.D.* A machine learning approach to multi-level ECG signal quality classification // *Comput. Methods Programs Biomed.* – 2014. – V. 117. – No. 3. – P. 435–447.

21. *Elhaj F.A. et al.* Arrhythmia recognition and classification using combined linear and nonlinear features of ECG signals // *Comput. Methods Programs Biomed.* – 2016. – V. 127. – P. 52–63.
22. *Alonso-Atienza F. et al.* Feature selection using support vector machines and bootstrap methods for ventricular fibrillation detection // *Expert Syst. Appl.* – 2012. – V. 39. – No. 2. – P. 1956–1967.
23. *Ibaida A. and Khalil I.* Distinguishing between ventricular tachycardia and ventricular fibrillation from compressed ECG signal in wireless Body Sensor Networks // *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* – 2010. – V. 2010. – P. 2013–2016.
24. *Abdullah Arafat M., Saeed J., and Kamrul Hasan M.* Detection of ventricular fibrillation using empirical mode decomposition and Bayes decision theory // *Comput. Biol. Med.* – 2009. – V. 39. – No. 11. – P. 1051–1057.
25. *XML essentials* [Электронный ресурс] // *XML Technology*. 2010. – URL: <http://www.w3.org/standards/xml/core> (дата обращения: 15.06.2017).
26. *Bochenek M., Fojcik M., and Cupek R.* OPC historical data access – OPC foundation toolkit improvement suggestions // *Commun. Comp. Inform. Sci.* – 2011. – V. 160 CCIS. – P. 338–347.
27. *NeuroLab* documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://pythonhosted.org/neurolab/> (дата обращения: 15.06.2017).
28. *Python* website [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 15.06.2017).

# АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ФАЙЛОВ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

*Ю.А. Прокудина, Н.С. Мирза*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Современные технологии автоматизированного проектирования предполагают использование современных измерительных технологий. В качестве одного из наиболее популярных методов получения трёхмерных координат по поверхности используется лазерное сканирование. Данный метод позволяет существенно сократить время на изыскательские работы, которые используются при проектировании объектов гражданского и промышленного строительства (таких, как дороги, мосты, трубопроводы и т.п.) [1, 2].

Однако полученное в результате сканирования облако точек довольно объёмно и требует разработки специальных методов автоматической обработки.

В данной статье описывается метод автоматического распознавания так называемых pole-like объектов по облаку трёхмерных точек лазерного сканирования.

Pole-like-объект – это объект дороги и придорожной территории, который своей формой напоминает столб (вытянутая 3D-геометрическая фигура). Pole-like-объектом может быть дорожный знак, светофор, фонарный столб, дорожный указатель и т. п. Нахождение подобных объектов автоматически из облака точек лазерного сканирования позволит увеличить скорость, а тем самым и эффективность изучения территории дороги и придорожной местности.

## **Алгоритм определения pole-like-объекта (Percentile-based algorithm)**

В качестве основы алгоритма распознавания был выбран Percentile-based algorithm [3].

Этот алгоритм анализирует объект по частям, что позволяет избежать ошибок в определении слишком высоких объектов или тех объектов, у которых нижняя часть широко расположена на поверхности земли.

На рис. 1 показана схема работы алгоритма определения pole-like-объекта. Алгоритм выполняет следующие этапы:

1. Разделение объекта-кандидата на несколько частей и выбор одной из них в качестве тестовой части.
2. Разделение этой части на несколько горизонтальных частей.
3. Проверка расположения центральной позиции между двумя соседними частями.
4. Проверка длины диагоналей и разницы диагоналей между двумя смежными частями (рис. 2). Если в каждой из частей все значения находятся в рамках пороговых значений (табл. 1), то такой компонент помечается как pole-like-объект.

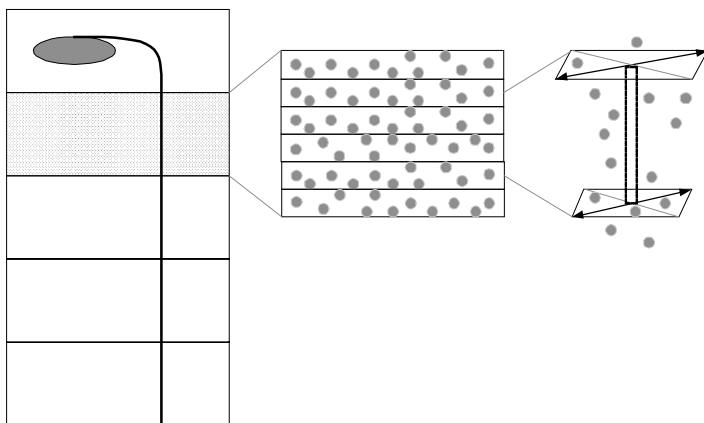


Рис. 1. Схема работы алгоритма Percentile-based

Схематическая диаграмма подсчётов разницы расположений центральных позиций и разницы диагоналей показана на рис. 2. Описание параметров представлено в таблице.

#### Описание пороговых параметров

Параметр	Описание
part	Высота части между двумя прямоугольниками
maxdiagpart	Максимальная диагональ части
diffpos	Разница между двумя средними точками смежных прямоугольников
diffdiag	Разница между двумя диагоналями смежных частей
numparts	Число частей посчитанных счетчиком

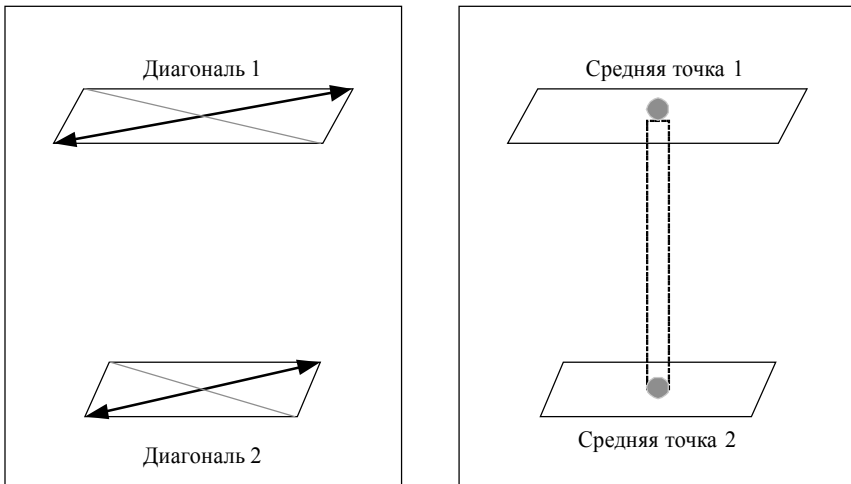


Рис. 2. Диагонали и разница между ними.  
Расстояние между средними точками смежных частей

### Алгоритм разбиения облака точек (Net algorithm)

Зачастую данные мобильного лазерного сканирования состоят из нескольких миллионов точек, поэтому, чтобы проанализировать каждый индивидуальный элемент, требуются мощные вычислительные ресурсы, которые являются затратными при исследовании объектов данных лазерного сканирования. Чтобы ускорить процедуру обработки, облако делится 2D-сеткой, состоящей из  $m$  столбцов и  $n$  строк, в 3D-структуры вертикальных колонн [4].

Каждая клетка сетки представляет колонну. Каждая колонна имеет уникальный идентификатор ID, определенный по его координатам  $(x, y)$  в 2D-сетке.

В ходе работы алгоритма, анализируется распределение точек в каждой колонне. Чтобы избежать рассмотрения колонн, как бесконечно длинных элементов, колонны делятся на несколько равных прямоугольных параллелепипедов. Процесс поиска начинается с самого нижнего занятого параллелепипеда (который содержит как минимум одну точку) и продолжается до тех пор, пока не будет обнаружен пустой. Как только пустота обнаружена, то точки во всех последующих вышележащих параллелепипедах удаляются и не рассматриваются в дальнейших

вычислениях (рис. 3). Таким образом каждая колонна формируется точками, у которых  $z$ -координата находится между самым нижним занятым параллелепипедом и первым пустым, найденным в колонне.

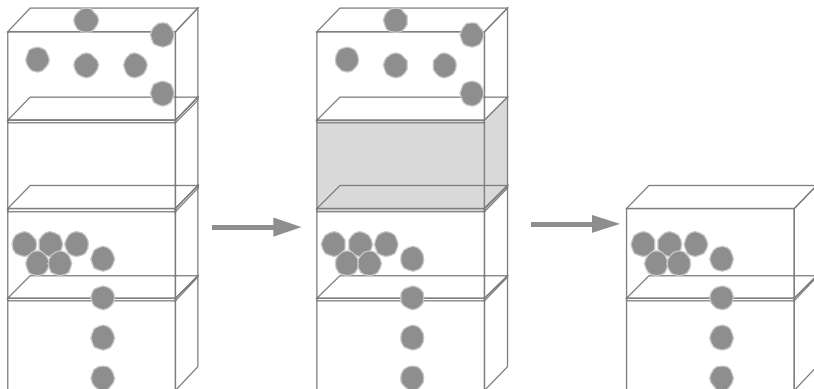


Рис. 3. Удаление точек из колонны, не относящихся к объекту

После описанных действий в каждой колонне будут присутствовать только точки, которые возвышаются над уровнем земли на пороговое расстояние. А точки, находящиеся выше порогового расстояния, удаляются, так как они без необходимости увеличивают вес колонны и могут препятствовать процессу определения *pole-like*-объектов.

### Программная реализация схемы распознавания *pole-like*-объектов

Для начала работы программы на вход подается файл облака точек, который содержит список трёхмерных координат снятых точек. Информация о точках считывается с файла и преобразуется в массив данных.

Далее этот изначальный массив точек проходит в алгоритм для наложения сетки (*Net*-алгоритм). В ходе алгоритма все точки проходят обработку, делятся по принадлежности к определенной колонне, либо удаляются, если не прошли соответствующие критерии алгоритма.

В результате остаются колонны, подходящие для следующих этапов обработки. Они стоят на поверхности (земле), состоят из точек колонны, в которой нет пустот (прямоугольных параллелепипедов с отсутствием точек).

Каждая колонна представляет собой множество точек и имеет соответствующий идентификатор. Множество таких колонок проходят на следующий этап работы алгоритма.

В цикле каждая колонна проверяется по Percentile-based-алгоритму с заданными параметрами физической формы определяемого pole-like-объекта и точностью его определения в процентах. Те колонны, которые проходят проверку по критериям алгоритма с положительным результатом, автоматически записываются в результирующие файлы. Имена файлов генерируются, в соответствии с ID колонны, содержащей pole-like-объект.

В программе используются пороговые значения фильтрации точек, позволяющие задать параметры определяемых объектов и точность, с которой будет происходить определение pole-like-объектов. Пороговые значения программы включают в себя пороговые значения Percentile-based-алгоритма, а также минимальную и максимальную высоту объекта.

### Результаты

В ходе применения предлагаемой схемы к реальному облаку точек были выявлены следующие положительные моменты:

- Возможность расчёта пороговых значений для различной плотности данных.
- Возможность выбора процентной точности вычисления (фильтрации).
- Возможность выбора физических параметров определяемых pole-like объектов.

Однако помимо положительных моментов были обнаружены также и следующие проблемы:

- Результат вычислений сильно зависит от специфики данных (большое расстояние между точками, малая плотность данных, близость объектов друг к другу).
- При применении Net-алгоритма не учитывается месторасположение объектов. При наложении сетки на облако точек происходит включение точек в определенные колонны в зависимости от их координат, без учёта того, что не все точки какого-то объекта могут принадлежать одной колонне или что колонна может содержать точки разных объектов.
- Уменьшение точности вычисления при последовательном применении алгоритмов фильтрации в общем алгоритме обработки.
- Возможность определения pole-like-объекта, который является плоским.



Предложенная схема работы алгоритмов может быть улучшена путём добавления новых функций и алгоритмов для расширения возможностей программы. Например, можно добавить алгоритм определения плотности точек в облаке в целом, либо в каждом объекте отдельно. Кроме того, можно в ходе работы алгоритмов разделять объекты, опираясь на их цвет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Геопроектирование* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geops.ru/services/lazernoe-skanirovanie/mobilnoe-lazernoe-skanirovanie/> (дата обращения: 12.05.2017).
2. *НИИПИСтройТЭК* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nipistroytek.ru/lazernoe-skanirovanie-i-geoinformatsionnye-tekhnologii/mobilnoe-lazernoe-skanirovanie/> (дата обращения: 12.05.2017).
3. *Li D.* Optimising Detection of Road Furniture (Pole-like Objects) in Mobile Laser Scanner Data // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2013. – V. 2-5/W2. – P. 163–168.
4. *Rodríguez-Cuenca B., García-Cortés S., Ordóñez C., and Alonso M.* Automatic Detection and Classification of Pole-Like Objects in Urban Point Cloud Data Using an Anomaly Detection Algorithm // Remote Sensing. – 2015. – V. 7–10. – P. 12680–12703 (дата обращения: 12.05.2017).

# АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЁТОМ МЕЖКАНАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

*А.Ж. Саринава*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

## Описание этапов алгоритма сжатия

В данной статье исследованы особенности каналов гиперспектрального аэрокосмического изображения (АИ) [1–3]. Предложен алгоритм с нахождением наилучшего канала межканальной корреляции с применением индексированного кодирования без потерь, позволяющий уменьшить размеры каналов изображения и преобразовать их перед сжатием. В результате степень сжатия обработанных каналов гиперспектральных АИ известными статистическими алгоритмами значительно выше. Также были приведены некоторые результаты исследования степеней сжатия по количеству групп каналов.

Последовательность этапов алгоритма:

1) расчет корреляционной матрицы между каналами АИ, нахождение лучшего коррелированного канала во всех возможных парах сочетаний, вычитание наилучших пар каналов АИ;

2) индексированное кодирование – это кодирование, при котором диапазон гиперспектральных данных варьируется от 0 до 255 байтов, предлагаемый алгоритм уменьшает данный диапазон, который варьируется от 0 до 68. Индекс – это номер позиции значения диапазона данных аддитивной цветовой модели RGB. Эффективность применения индексации и повышение степени сжатия в том, что индексы лежат в небольшом диапазоне, за счет этого они хорошо сжимаются энтропийным кодированием;

3) сжатие статистическим алгоритмом.

Рассмотрим поэтапность алгоритма.

**1 этап.** Учет междиапазонной корреляции.

Рассчитаем величину корреляции (междиапазонной зависимости) между каналами гиперспектральных АИ, что позволит уменьшить диапазон изменения данных, значит, потребуется меньшее число разрядов

для их хранения. Найдем наилучший коррелированный канал (best). Произведем учет междиапазонной корреляции между выбранными каналами (группами) гиперспектрального аэрокосмического изображения путем выбора значения корреляции и формирования массивов отклонений (разностей) исходных данных.

Вычитание (разностное преобразование) даёт особое преимущество при сжатии гиперспектральных аэрокосмических изображений, при этом учитывая их спектральные характеристики, а именно высокую межканальную корреляцию, что повышает степень сжатия, чем универсальные алгоритмы, не учитывающие особенности АИ.

### **2 этап.** Индексированное кодирование.

Эффективностью алгоритма является диапазон гиперспектральных данных с использованием дополнительных одномерных структур данных. В структурах данных значения сохраняются в виде индексов. Индексом выступает номер позиции значения диапазона данных канала гиперспектральных АИ. Далее вместо оригинальных значений гиперспектрального аэрокосмического изображения сохраняются неповторяющиеся индексы значений вспомогательных структур данных.

Формирование новой оригинальной структуры данных путем вычитания блока последовательности значений получаем уменьшенное изображение. Таким образом, определены внутренние блочные элементы канала изображения, что создаёт три основные структуры данных.

Преимущество предлагаемого алгоритма в том, что индексы лежат в небольшом диапазоне, за счет этого они хорошо сжимаются энтропийным кодированием и стандартными алгоритмами сжатия.

### **3 этап.** Сжатие известным арифметическим кодированием.

## **Тестовые гиперспектральные данные алгоритма**

Для определения эффективности предлагаемого алгоритма с точки зрения степени сжатия, а также пределов его применимости проведен ряд экспериментов на гиперспектральных АИ (Avisir) (таблица).

На рис. 1 представлены алгоритмы сжатия при варьируемом количестве каналов и геометрическом размере (50×50) в сравнении с универсальными архиваторами Winrar, 7Z и *JPEG Lossless*. Показатели степени сжатия  $D$  на 25 % выше, чем универсальные алгоритмы, за счет учета межканальной корреляции и индексированного кодирования.

## Характеристики тестовых гиперспектральных АИ

Количество каналов	Размер изображения	Размер, байт	Количество каналов	Размер изображения	Размер, байт
50	50×50	540800	150	300×300	54360600
50	100×100	2040200	150	400×400	96480600
50	200×200	8080200	150	614×512	188620800
50	300×300	18120200	200	50×50	2163200
50	400×400	32160200	200	100×100	8160800
50	614×512	62873600	200	200×200	32320800
100	50×50	1081600	200	300×300	72480800
100	100×100	4080400	200	400×400	128640800
100	200×200	16160400	200	614×512	251494400
100	300×300	36240400	224	50×50	2421632
100	400×400	64320400	224	100×100	9140096
100	614×512	125747200	224	200×200	36199296
150	50×50	1622400	224	300×300	81178496
150	100×100	6120600	224	400×400	144077696
150	200×200	24240600	224	614×512	281673728

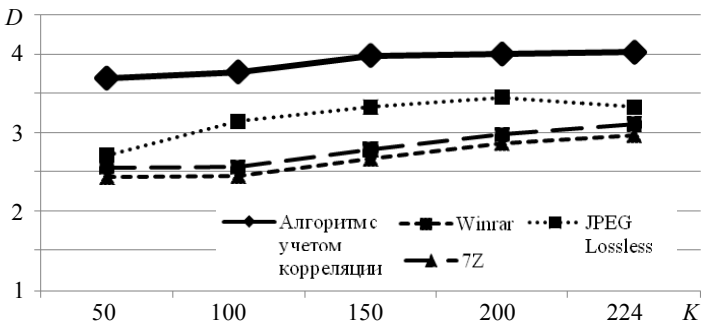


Рис. 1. Сравнение алгоритмов сжатия без потерь по степени сжатия

Как видно из рис. 2, показатели степени алгоритма сжатия *I* превосходят в степени сжатия архиваторы *WinRAR*, *7Z* и *JPEG Lossless* более чем на 80 %.

Для повышения эффективности применяемого алгоритма проведены эксперименты по следующим параметрам:

- 1) *Cor* – заданное значение корреляции;
- 2) *N* – номер группы каналов АИ;
- 3) *R* – размер каналов АИ;
- 4) *K* – количество каналов в группе *N*.

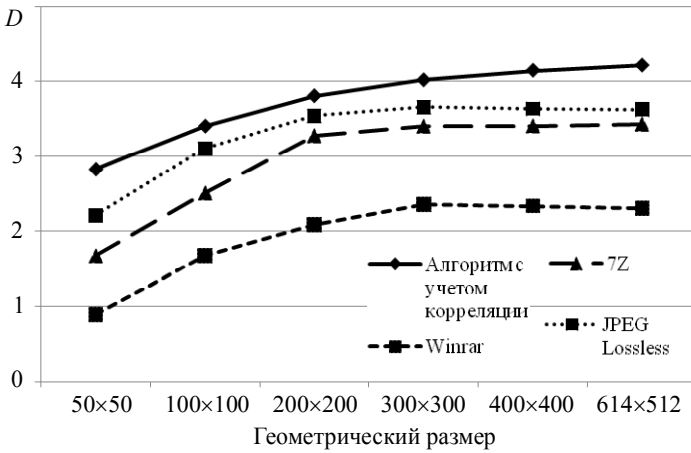


Рис. 2. Сравнение алгоритмов сжатия без потерь при различном размере

По результатам эксперимента зависимости степени сжатия алгоритмов с учетом корреляции и от количества групп, рекомендуемые значения параметров (рис. 3) следующие:  $N = 2 - 10$ .

Это говорит о том, что вычитание (разностные преобразования) эффективны при выборе большого спектра каналов в группе, тогда средние значения разностей  $Sr$  будут наименьшими, что позволит хранить в наименьшем объеме на диске, чем при малом количестве  $K$  в  $N$ .

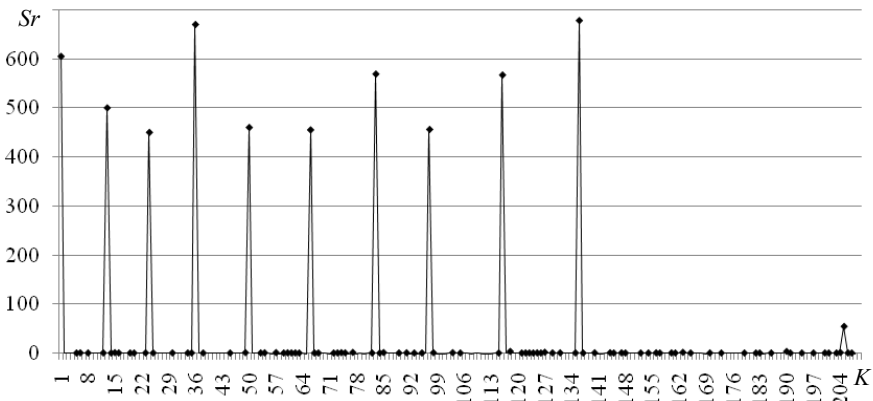


Рис. 3.  $Sr$  наилучших каналов и их разностей

По результатам экспериментов зависимости корреляции от выбранных групп каналов и наилучшего канала (рис. 4) выявлено, что при значении  $Cor$  уменьшается пропорционально  $K$ .

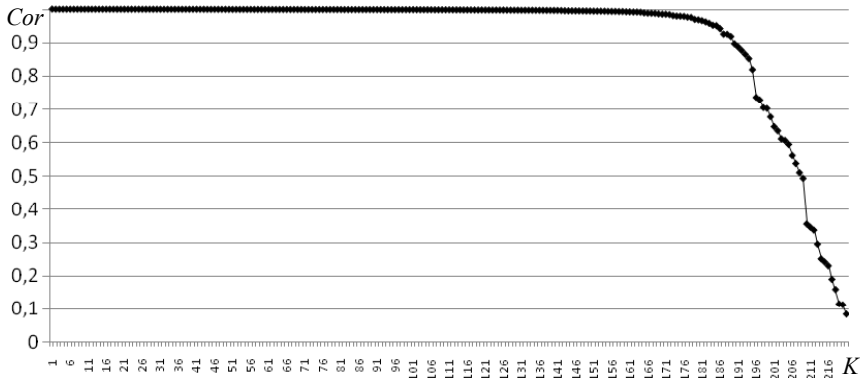


Рис. 4. Межканальная корреляция

В завершение исследований было отмечено, что эффективность в степени сжатия достигается (рис. 5) в применении предлагаемого алгоритма сжатия с учетом корреляции, который находит наилучшие пары коррелированных каналов, чем без поиска (при выбранном отсчетном канале).

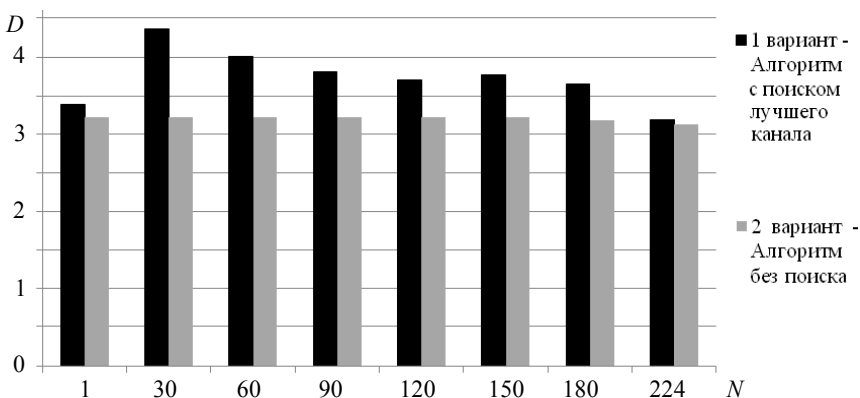


Рис. 5. Алгоритмы сжатия от выбранного варианта

По результатам экспериментов по вычислительной эффективности (рис. 6) применяемых алгоритмов показано, что алгоритм с поиском наилучшего канала занимает достаточно больше времени, чем без поиска, так как большие затраты по времени отведены на расчет межканальной корреляции и других промежуточных вычислений.

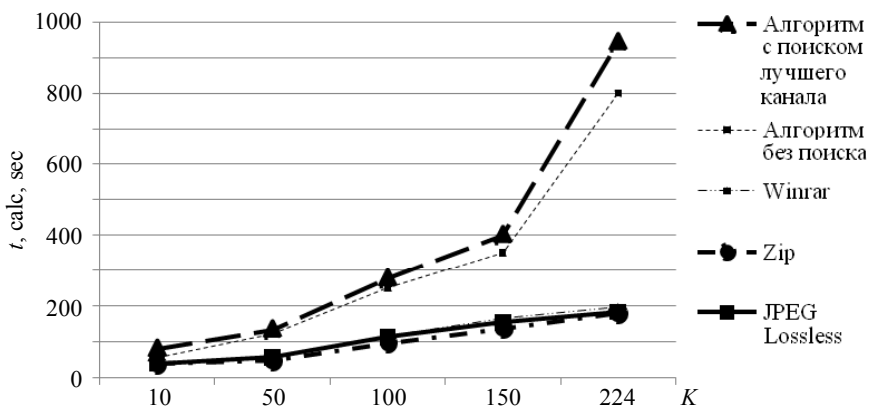


Рис. 6. Методы и алгоритмы сжатия без потерь по времени выполнения

### Заключение

На основе проведенных исследований следует сделать следующие выводы:

- алгоритм сжатия без потерь с учетом междиановой корреляции позволяет повысить степень сжатия до ( $D > 4$ ), чем в универсальных архиваторах и алгоритме JPEG Lossless;

- предлагаемый подход нахождения наилучших групп каналов при заданном значении корреляции повысил эффективность применения этапа вычитания каналов (разностного преобразования);

- полученные результаты сравнения преобразованных гиперспектральных АИ с архиваторами и JPEG 2000 Lossless позволяют предположить эффективность применения этапов индексированного кодирования.

Перспективами дальнейших исследований могут быть кодирование преобразованных гиперспектральных АИ адаптивным алгоритмом, применяющим регрессионный анализ, и новой моделью учета межканальной корреляционной зависимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Yuan L., Jianping L., and Ke G.* Lossless compression of hyperspectral images using hybrid context prediction // *Optics Express.* – 2012. – V. 20. – No. 7. – P. 8199–8206.
2. *Замятин А.В., Саринаова А.Ж.* Алгоритм сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учетом байтовой обработки и междиапазонной корреляции // *Прикладная информатика.* – 2013. – № 5 (47). – С. 37–42.
3. *Changguo Li, and Ke Guo.* Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Three-Stage Prediction with Adaptive Search Threshold // *Int. J. Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition.* – 2014. – V. 7. – No. 3. – P. 305–316.
4. *Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Adaptive Prediction and Backward Search Schemes* // *J. Inform. Sci. Eng.* – 2011. – V. 27. – P. 419–435.
5. *Emmanuel Christophe.* *Hyperspectral Data Compression Tradeoff. Augmented Vision and Reality*, 3. – Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
6. *Yuan Liang, Jianping Li, and Ke Guo.* Lossless compression of hyperspectral images using hybrid context prediction // *Optics Express.* – March 2012. – V. 20. – No. 7. – P. 8199
7. *Ayman Ahmed, Salwa ElRamly & Mohamed El. Sharkawy.* Hyperspectral Data Compression Using Weighted Spatial-Spectral Lossless Coding Technique // *Int. J. Image Proc. (IJIP).* – 2012. – V. 6. – Iss. 6. – P. 468–477.
8. *Qiang Z., Pauca V.P., and Plemmons R.* Randomized methods in lossless compression of hyperspectral data // *J. Appl. Remote Sensing 074598-1 SPIE.* – 2013. – V. 7.
9. *Raffaele Pizzolante and Bruno Carpentieri.* On the Compression of Hyperspectral Data // *IT CoNvergence PRActice (INPRA).* – 2013. – V. 1. – No. 4. – P. 24–38.
10. *Kai-Jen Cheng.* *Compression of Hyperspectral Images* // *School of Electrical Engineering and Computer Science.* 2013. Dissertation.
11. *Ganeshraj P. and Sivasankar A.* Scalable Compression Method for Hyperspectral Images // *J. Eng. Sci.* – 2013. – V. 2. – P. 1–5.
12. *Changguo Li and Ke Guo.* Lossless Compression of Hyperspectral Images Using Three-Stage Prediction with Adaptive Search Threshold // *Int. J. Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition.* – 2014. – V. 7. – No. 3. – P. 305–316
13. *Diego Valsesia and Enrico Magli.* A Novel Rate Control Algorithm for Onboard Predictive Coding of Multispectral and Hyperspectral Images. – 2014.
14. *Raffaele Pizzolante and Bruno Carpentieri.* Band Clustering for the Lossless Compression of AVIRIS Hyperspectral Images // *ACEEE Int. J. Signal and Image Processing.* – 2014. – V. 5. – No. 1, January.
15. *Lefei Zhanga, Liangpei Zhangb, Dacheng Taoc, et al.* Compression of hyperspectral remote sensing images by tensor approach // *Neurocomputing.* – 2015.



# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТБОРА КАРТОФЕЛЯ

*М.В. Трусфус*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

В процессе отбора и сортировки семенного картофеля необходимо отфильтровать картофель и мусор разного рода. Для этого возможно использование оптических методов распознавания объектов на изображении.

Сортируемые клубни семенного картофеля проходят через конвейер, над лентой которого установлена цифровая камера. На ленте конвейера помимо самих клубней картофеля может встречаться различный мусор в виде гвоздей, веток и прочих посторонних объектов. Интеллектуальная система должна обнаружить объекты на конвейере и отнести их к одному из классов: гвозди или клубень картофеля.

Существуют системы автоматической фильтрации металлических объектов, основанные на работе электромагнита. Они частично решают задачу фильтрации металлического мусора. Однако такие системы не способны обнаружить мусор, не взаимодействующий с магнитным полем, например ветки.

С целью решения существующих проблем спроектирована интеллектуальная система на основе применения методов распознавания образов с целью фильтрации семенного картофеля.

## **Классы объектов и признаки**

В качестве классов объектов определены следующие классы:

1. Клубни семенного картофеля. К данному классу относятся все объекты, которые на фотоснимке похожи на клубни картофеля.

2. Мусор. К данному классу относятся все посторонние объекты, в том числе ветки, гвозди и другой мусор.

Информативными признаками являются средние яркости участков фотографии объекта, постигаемой с камеры над конвейером. Изображение объекта приводится к размеру 200×200 пикселей, таким образом, чтобы размер широкой стороны составил 200 пикселей, по бокам узкой стороны наращиваются полосы черного цвета. Полученное изображе-

ние размером  $200 \times 200$  пикселей делится на 10 ячеек размером  $20 \times 20$  пикселей в соответствии со схемой на рис. 1.

Для каждой ячейки вычисляется средняя яркость пикселей. Для этого сумма яркостных компонент цвета в цветовой модели HSV делится на площадь ячейки (количество пикселей в ячейки). Так как размер каждой ячейки  $20 \times 20$  пикселей, то площадь ячейки 400 пикселей.

Полученные средние яркости ячеек являются информативными признаками.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Рис. 1. Деление изображения на ячейки

Так как специфика признаков не совсем очевидна, неизвестна зависимость между признаками и классами. Поэтому возникает необходимость разработки интеллектуальной системы. В данном исследовании рассмотрены классификаторы на основе теоремы Байеса, машины опорных векторов, дерева решений и случайного леса [1].

### Экспериментальное исследование

В качестве критерия эффективности классификатора определим вероятность ошибки, вычисляемую по формуле

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n eq(f^*(x^{(i)}), y^{(i)}), \quad (1)$$

где  $n$  – количество элементов контрольной выборки;  $f^*(x^{(i)})$  – результат классификации объекта с вектором признаков  $x^{(i)}$  классификатором;  $y^{(i)}$  – номер класса объекта с вектором признаков  $x^{(i)}$ , определенный экспертом;

$$eq(a, b) = \begin{cases} 1, & a = b, \\ 0, & a \neq b. \end{cases}$$

Чем ниже вероятность ошибки, тем эффективнее классификатор. Наиболее подходящий классификатор определяется экспериментальным путем [2].

Для работы классификаторов они должны быть предварительно обучены. Для этого подготовлена выборка из 200 объектов, состоящая из 98 фотографий различных клубней картофеля, 54 фотографий различных гвоздей, в том числе ржавых и гнилых, 48 фотографий веток различной формы и размера.

В ходе каждого эксперимента выборка разделяется на обучающую и контрольную случайным образом так, чтобы в каждой подвыборке присутствовала половина объектов каждого класса из всей выборки. Затем происходит обучение классификатора на обучающей выборке и определение вероятности ошибки на контрольной выборке по формуле (1). Чтобы исключить влияние конкретного разбиения выборки на оценку качества работы классификатора, для каждого классификатора эксперимент проведен 10 раз. При реализации программных средств использована библиотека OpenCV.

Результаты эксперимента с использованием классификатора на основе теоремы Байеса представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Вероятность ошибки байесовского классификатора**

Номер эксперимента	Вероятность ошибки, %
1	3
2	3
3	3
4	1
5	3
6	0
7	6
8	3
9	6
10	2
Среднее значение	3

Опытным путем для классификатора на основе машины опорных векторов установлено оптимальное значением коэффициента штрафа для минимизации вероятности ошибки является значение 0, ядро – полиномиальная функция со степенью полинома 2 степени.

Результаты эксперимента с использованием классификатора на основе машины опорных векторов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Вероятность ошибки классификатора SVM**

Номер эксперимента	Вероятность ошибки, %
1	2
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	2
9	0
10	0
Среднее значение	0,4

Для классификатора на основе дерева решений оптимальная высота – 2 уровня, минимальное количество объектов в узле для продолжения разбиения – 3 без перекрестного контроля при выполнении процедуры отсечений. Результаты эксперимента с использованием классификатора на основе дерева решений представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Вероятность ошибки классификатора на основе дерева решений**

Номер эксперимента	Вероятность ошибки, %
1	1
2	0
3	0
4	4
5	0
6	0
7	5
8	5
9	0
10	5
Среднее значение	2

Для классификатора на основе случайного леса оптимальное количество признаков, выбираемых случайным образом для обучения каждого дерева решений, равно 10.

Результаты эксперимента с использованием классификатора на основе случайного леса представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Вероятность ошибки классификатора на основе случайного леса**

Номер эксперимента	Вероятность ошибки, %
1	5
2	1
3	0
4	0
5	5
6	0
7	0
8	4
9	5
10	0
Среднее значение	2

По результатам исследования можно сделать вывод, что для сортировки клубней семенного картофеля наиболее подходит классификатор на основе машины опорных векторов. Он дает наименьшую вероятность ошибки, которая почти не чувствительна к представительности обучающей выборки. Другие рассмотренные классификаторы существенно зависят от набора представителей в обучающей выборке.

**Заключение**

По результатам экспериментов средняя точность классификации составляет 99,6 %. Также можно отметить, что в 8 из 10 экспериментов по обучению классификатора удалось достичь 100 %-й точности распознавания.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная интеллектуальная система может быть использована для достоверной сортировки клубней семенного картофеля.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1984.
2. Caruana R. and Niculescu-Mizil A. An empirical comparison of supervised learning algorithms // Proc. 23rd Int. Conf. Machine Learning. – 2006.

# **ИНФОРМАЦИОННО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ МЕДИЦИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

*А.С. Углов, А.В. Замятин*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Точная или персонализированная медицина – это оказание комплексной медицинской помощи, осуществляемое в соответствии с характеристиками конкретного пациента [1, 2]. Этот термин учитывает не только используемые уже в течение долгого времени клинические признаки, такие, как возраст, пол, телосложение, семейная история, но и молекулярные характеристики организма пациента. Последние включают данные геномных и постгеномных исследований, в том числе протеомики и метаболомики, выполненные при помощи современных высокотехнологичных методов молекулярной биологии и медицины. Основной целью персонализированной медицины является разделение популяции здоровых и больных людей на отдельных индивидуумов, отличающихся по вероятности возникновения заболевания и по способности реагировать на те или иные виды терапии. Такая классификация позволит рационально и прицельно применять терапевтические воздействия с максимальной пользой и минимумом неблагоприятных эффектов для отдельного человека. Актуальность направления персонализированной медицины подтверждается его включением в дорожную карту развития мероприятий «Хелснет» Национальной технической инициативы России [3, 4].

Для решения задач медицинской диагностики сейчас создаются интеллектуальные системы, которые с помощью технологий анализа больших массивов медицинских данных могут получать новую информацию о пациенте, которая позволяет более точно определять у него наличие определенных заболеваний или предрасположенность к ним.

Важным направлением в медицинской диагностике является развитие малоинвазивных и неинвазивных методов. Одним из таких является современный метод анализа иммуносигнатуры, который показывает сравнительно высокую точность определения заболеваний, что делает

его перспективным для использования в клинической практике [5, 6]. Вместе с тем не существует автоматизированных диагностических систем на основе этой технологии, которые позволяли бы клиникам, врачам или пациентам загружать данные иммуносигнатур и получать результаты диагностики на основе интеллектуального анализа этих данных.

В этой работе предлагается концепция построения системы для медицинской диагностики на основе технологий интеллектуального анализа иммуносигнатурных и других медицинских данных.

### Существующие решения

Медицинские экспертные системы используются для помощи специалистам в диагностике заболеваний и назначении лечения, решая задачи поиска необходимой информации в больших объемах данных, с чем сам специалист может не справиться ввиду отсутствия необходимой квалификации в анализе данных и ограниченности ресурсов. Одной из известных современных экспертных систем является IBM Watson [7]. Эта система может отвечать на запросы, сформулированные пользователем на естественном языке. Для ответа на запрос она обрабатывает данные, загруженные из различных источников: энциклопедий, баз научных статей, антологий знаний и т.п. На базе этой системы было реализовано несколько проектов для обработки медицинских данных с целью диагностики заболеваний. Одним из таких проектов является IBM Watson for Oncology [8]. В этом проекте мощности IBM Watson были применены для помощи онкологам в определении оптимальных стратегий лечения рака. Для этого в систему IBM Watson для обучения загрузили множество медицинских документов, в том числе 25 тысяч историй болезни, более 200 медицинских журналов и учебников, всего около 15 млн страниц текста. При помощи графического интерфейса специалист-онколог может посмотреть информацию об определенном пациенте, которая получена, в том числе, с помощью анализа системой загруженных неструктурированных медицинских данных из различных источников. Далее система предлагает специалисту проверить данные и подтвердить их корректность. На основе проделанного анализа система предлагает специалисту описание клинического случая и варианты терапии для этого пациента, с указанием ссылок на источники, откуда была получена информация. Кроме того, система предоставляет ссылки

на источники, где есть информация, релевантная рассматриваемому клиническому случаю [8].

Следующий проект от IBM, Medical Sieve направлен на помощь специалистам в исследовании медицинских изображений [9]. На данный момент проект находится в стадии разработки. Эта система будет анализировать медицинские изображения типа снимков магнитно-резонансной томографии (МРТ), кардиограмм и т.п., с использованием методов технического зрения и машинного обучения, и делать их описание с учетом информации, доступной о пациенте из других медицинских источников [10].

Проект Human Diagnosis project (Human Dx) сочетает «усилия коллективного разума» и машинное обучение [11]. Предполагается, что для проекта будут собраны описания симптомов, результаты медосмотров, личные и семейные медицинские истории, показания диагностических приборов и носимых устройств, результаты лабораторных исследований, медицинские визуализации, генетические и эпигенетические данные, научные публикации в области биомедицинских наук, медицинская статистика и т. п. На основе этих данных разрабатывается фундаментальная структура, к которой сможет обратиться любой врач, пациент, организации, индивидуальный исследователь, а также устройства или приложения. Краткосрочная цель проекта – оказывать помощь в своевременной и верной диагностике заболеваний и назначении лечения, а также в медицинском образовании. Долгосрочная цель – радикально изменить в лучшую сторону стоимость, доступность и эффективность медицинской помощи во всём мире. По словам руководителя проекта, данные сейчас поставляют тысячи врачей из 400 учреждений в 60 странах. Сейчас проект находится в стадии разработки и о конкретных результатах применения интеллектуальной диагностики не известно [12–14].

### **Технология иммуносигнатуры**

Один из современных перспективных малоинвазивных методов диагностики заболеваний основан на технологии иммуносигнатуры, заключающейся в применении микрочипов, на которые наносится массив пептидов со случайными аминокислотными последовательностями [5, 15]. Пептиды служат частичным или полным подобием эпитопов антигена (мимеотоп). При взаимодействии подобного массива пептидов с



антителами из исследуемого образца крови образуется паттерн, который характеризует текущее состояние иммунитета человека. Далее, на выборке из таких паттернов методы классификации обучаются определять типы заболеваний. Вектор признаков, в данном случае, складывается из значений светимости пептидов в одном или нескольких спектрах после реакции с сывороткой крови, с добавлением флуоресцентного красителя [5].

### **Концепция автоматизированного медицинского комплекса для решения задач персонализированной медицины**

Описанные выше проекты показывают тенденцию развития интеллектуальных систем в медицинской сфере в сторону централизованных комплексов, использующих методы интеллектуального анализа больших объемов загруженных в них медицинских данных различных типов для извлечения информации о состоянии здоровья человека и формирующих на основе этой информации рекомендации по лечению, которые учитывают индивидуальные особенности пациентов и их медицинской истории. Они также предоставляют пользователям интерфейс с инструментами визуализации для получения необходимой информации в удобном для каждой конкретной группы пользователей виде. К тому же ни одна из этих систем не использует технологию анализа иммуно-сигнатур, которая уже показывает достаточно высокую точность диагностики заболеваний, и до сих пор не существует полноценных функционирующих автоматических систем ранней диагностики на основе данной технологии [5]. С учетом этих фактов предлагается концепция построения системы хранения и интеллектуального анализа иммуно-сигнатурных и других медицинских данных различных типов (результатов биомаркерных тестов, данных медицинских карт и анамнеза, статических изображений, динамического видео и др.), которая позволит с высокой точностью проводить медицинскую диагностику, а также формировать рекомендации по лечению заболеваний на основе персональных характеристик конкретного пациента. Эта система будет предоставлять удаленный доступ к загруженным данным и результатам интеллектуального анализа различным группам пользователей: врачам различных специальностей, пациентам, сторонним исследователям и т.д.

### Требования к системе

В предлагаемой концепции система должна выполнять следующие основные функции:

1) Хранение больших объемов медицинских данных различных форматов и обеспечение безопасности хранения персональных данных пациентов.

2) Интеллектуальный анализ хранимых данных с целью получения из них новых знаний, имеющих значение для медицинской диагностики.

3) Интерфейс для предоставления доступа к данным как пользователям, через систему графических интерфейсов, так и автоматизированным системам, через специализированное API. В том числе система должна предоставлять инструменты для загрузки данных различных типов поставщикам медицинских данных. На рис. 1 предложена принципиальная схема такой системы.

Все поступающие медицинские данные содержатся в центральном хранилище. Модуль интеллектуального анализа содержит подсистемы, реализующие соответствующие алгоритмы анализа данных и машинного обучения для различных типов данных из хранилища. Результаты информационного анализа также сохраняются в центральном хранилище. Для предоставления данных, актуальных для определенных предметных областей, будет использоваться концепция *витрин данных* [16]. Предоставление доступа к системе и инструментам для формирования запросов, а также для визуализации данных реализуется через систему графических интерфейсов пользователей и API.

Далее рассмотрим подробнее модули, отвечающие за реализацию основных функций системы.

### Модуль хранения данных

Для хранения больших массивов медицинских данных разнообразных типов предполагается использовать технологию хранилищ данных [17]. В рамках этой технологии, помимо организации СУБД, также рассматриваются процессы загрузки поставщиками медицинских данных, с их корректировкой и преобразованием в единый формат. Этот процесс известен как ETL (Extract, Transform, Load). В нем также предусмотрено сохранение так называемого аудиторского следа – информации о том, каким образом и из каких исходных данных сформированы данные в центральном хранилище [18].

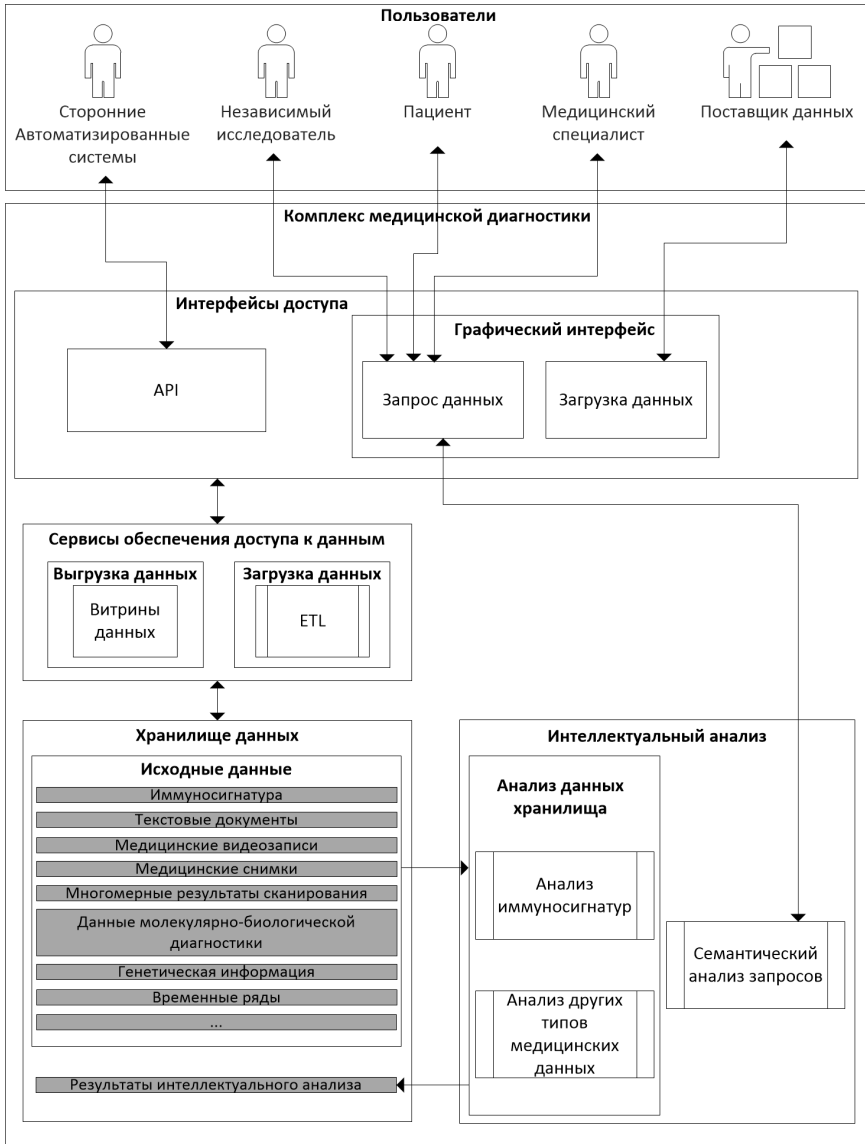


Рис 1. Концептуальная схема комплекса интеллектуального анализа медицинских данных для диагностики заболеваний

Для того чтобы снизить нагрузку на основную базу данных, а также разграничить доступ к данным различным группам пользователей, предполагается применять концепцию витрины данных. Витрина данных представляет собой отдельный сервис внутри системы, который загружает из центрального хранилища данные, актуальные для группы пользователей, работающих в определенной предметной области. Такой подход позволяет снять нагрузку с основного хранилища, так как выборка данных для ответа на пользовательский запрос производится не из центральной базы данных, а из базы данных витрины, содержащей только специализированную информацию для некоторой предметной области.

### **Модуль интеллектуального анализа данных**

В этом модуле происходит интеллектуальный анализ поступающих в хранилище данных. Основные функции модуля:

1) Обучение систем искусственного интеллекта (ИИ) для автоматического получения знаний из больших массивов данных, находящихся в центральном хранилище.

2) Использование подходов к искусственному интеллекту для внутренних механизмов комплекса (например, определение семантики пользовательских запросов на естественном языке).

Основной задачей подсистемы ИИ будет работа с алгоритмами обучения классификаторов для автоматической постановки диагноза и классификации заболеваний человека по его разнообразным медицинским данным. Для каждого определенного типа данных в этом модуле реализуются соответствующие алгоритмы анализа. Результат анализа также сохраняется в центральном хранилище данных и может быть использован для уточнения результатов диагностики с помощью других методов.

В частности, для анализа иммуносигнатурных данных предполагается реализовать классификаторы, работающие на основе метода опорных векторов, а также нейронной сети Хэмминга, которые показали относительно высокие результаты точности [5, 6]. В дальнейшем предполагается исследовать возможность применения для задачи диагностики заболеваний с помощью иммуносигнатурных данных других методов классификации, таких как сверточные нейронные сети, деревья решений и ансамбли классификаторов.

## Обработка запросов пользователей

Пользовательский интерфейс системы должен предоставлять возможность формировать запросы к системе. Запросы могут формулироваться как через набор фильтров, так и с помощью естественного языка. В последнем случае модуль интеллектуального анализа также будет заниматься обработкой поступающих запросов с целью определения их семантики и разбора структуры для передачи в другие подсистемы.

## Заключение

Предложенная концепция может служить основой для проектирования автоматических систем медицинской диагностики на основе интеллектуального анализа различных типов медицинских данных. В первую очередь будет реализовываться система диагностики на основе анализа данных иммуносигнатуры, так как эта достаточно новая технология диагностики уже показывает относительно высокие показатели точности классификации заболеваний, а также уже имеются предварительные результаты исследований в этом направлении. В дальнейшем для анализа планируется использовать альтернативные типы медицинских данных, такие, как анализ данных видеокolonоскопии, и методы обработки естественного языка для анализа медицинских текстов и документов, а также для обработки запросов пользователей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Пальцев М.А.* Персонафицированная медицина // Наука в России. – 2011. – № 1. – С. 12–17.
2. *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича»* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ibmc.msk.ru/ru/departments/304> (дата обращения: 01.06.2017).
3. *HealthNet* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nti2035.ru/markets/healthnet> (дата обращения: 04.05.2017).
4. *План мероприятий («дорожная карта») «Хелснет» Национальной технологической инициативы* [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.nti2035.ru/markets/docs/DK\\_healthnet.pdf](http://www.nti2035.ru/markets/docs/DK_healthnet.pdf) (дата обращения: 16.07.2017)
5. *Stafford P., Cichacz Z., Woodbury N.W., and Albert S.* Immunosignature system for diagnosis of cancer // PNAS. – 2014.
6. *Андрющенко В.С., Перец Е.Ю., Лялюхова И.Е.* Классификация иммуносигнатурных данных для задач ранней диагностики опасных заболеваний // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017): Мате-

- риалы XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (29 сентября – 3 октября 2017 г.). – Томск: Изд-во НТЛ – 2017. – Ч. 2. – С. 18–25.
7. IBM Watson [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com/watson/> (дата обращения: 11.07.2017)
  8. *Watson for Oncology* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com/watson/health/oncology-and-genomics/oncology/> (дата обращения: 21.05.2017)
  9. *Medical Sieve* [Электронный ресурс]. – URL: [http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view\\_group.php?id=4384](http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_group.php?id=4384) (дата обращения: 12.05.2017)
  10. *IBM's Health Analytics and Clinical Decision Support* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4287097/> (дата обращения: 17.07.2017).
  11. *Human Diagnosis Project. Project Background* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.humandx.org/context/background> (дата обращения: 22.05.2017).
  12. *Project crowdsources specialists' diagnoses for safety-net care, 2017* [Электронный ресурс]. – URL: <https://wire.ama-assn.org/delivering-care/project-crowdsources-specialists-diagnoses-safety-net-care> (дата обращения 12.05.2017).
  13. *Алексеева А.* Искусственный интеллект в медицине // 14.04.2017 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=39072> (дата обращения: 22.05.2017).
  14. *Anne Field Building A 'Collective Superintelligence' For Doctors And Patients Around The World, 27.02.2017* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.forbes.com/sites/annefield/2017/02/27/building-a-collective-super-intelligence-for-doctors-and-patients-around-the-world/> (дата обращения: 12.05.2017).
  15. *Шановал А.И., Легутки Д.Б., Стаффорд Ф. и др.* Иммуносигнатура (immunosignature) – пептидные микроэреы для диагностики рака и других заболеваний // Российский онкологический журнал. – 2014.
  16. *Ponniiah P.* Data warehousing fundamentals for IT professionals. – 2nd ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
  17. *Data Warehousing Tutorial* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tutorialspoint.com/dwh/> (дата обращения: 01.02.2017).
  18. *Мокрышев А.* Основные функции ETL-систем [Электронный ресурс] // Хабрахабр. – 19.01.2015. – URL: <https://habrahabr.ru/post/248231/> (дата обращения: 23.05.2017).

# РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЯ

*Ю.А. Шестакова*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Для выращивания растения необходимо постоянно следить за условиями окружающей среды и внешними данными растения. Если растение начинает увядать, требуется своевременная реакция и поиск причин ухудшения состояния. Больные растения, как правило, отличаются формой листьев, изменением листьев, наличием пятен на листьях и текстурой.

Цель исследования – разработать алгоритм распознавания состояния растения для автоматизированной системы контроля роста растений.

Функция алгоритма заключается в определении состояния растения как больного или здорового.

Для проведения исследований было выбрано семейство пасленовых, как одна из популярных в нашей стране культур, выращиваемых в теплицах. В качестве опытного образа рассмотрен перец стручковый. Работа в рамках одного биологического вида позволит получить качественные результаты, что, в свою очередь, повысит точность разрабатываемого метода и алгоритма.

## Алгоритм решения задачи

Объекты на изображении классифицируются на 2 класса, каждый класс определен своими характеристиками:

- 1 класс – здоровые растения, характеризуется отсутствием внешних дефектов;
- 2 класс – больные растения, характеризуется наличием внешних дефектов.

Определить состояние можно по следующим визуальным признакам, таким, как цвет, форма и текстура. В качестве главного показателя выберем общий цвет листьев.

Имеется выборка их 219 изображений больных растений и 129 изображений здоровых растений. Выявлены следующие визуальные отличия между здоровыми и больными растениями. Цвет листьев больных растений отличается от здоровых. Больные листья имеют желтый отте-

нок, засохшие листья приобретают коричневый цвет (рис. 1, б), в то время как здоровые растения имеют ровный зеленый цвет (рис. 1, а). Также больные листья загибаются, и место загиба имеет светло-зелёный цвет (рис. 1, в).



Рис. 1. Примеры изображений растений:  
а – здоровое растение, б – засохший лист, в – кривой лист

Выдвинем гипотезу о том, что можно различать больные и здоровые растения по количеству оттенков зеленого.

Для проверки гипотезы переведем изображение в палитру HSV. Доминирующий тон растения зеленый. В библиотеке OpenCV зеленый цвет соответствует значениям Hue от 34 до 72 палитры HSV.

Возьмем в качестве признаков количество пикселей каждого значения Hue в заданном диапазоне. Для исключения влияния фона на результат разделим полученное количество на общее количество пикселей, соответствующих зеленому цвету. Таким образом мы получаем выборку в виде  $(x_i, y_i), (i = 1, m), x \in X$ , где  $x_i$  – векторы значений признаков, а  $y_i$  – значение функции, полученное из опыта  $y_i = u(x_i)$ ;  $X$  – множество признаков  $X = (X_1, X_2 \dots X_n)$ , где  $X_n$  соответствует значению Hue заданного диапазона, а  $n$  – количеству оттенков зеленого.

Соответствие обозначений  $X_n$  и значений Hue показано в таблице.

Вычислим средние показатели каждого признака для каждой выборки по формуле

$$f(x_n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ni}. \quad (1)$$

Построим график по полученным результатам (рис. 2).



Признаки

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{17}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$
47	48	50	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
$x_{27}$	$x_{28}$	$x_{29}$	$x_{30}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$	$x_{35}$	$x_{36}$	$x_{37}$	$x_{38}$	$x_{39}$
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72

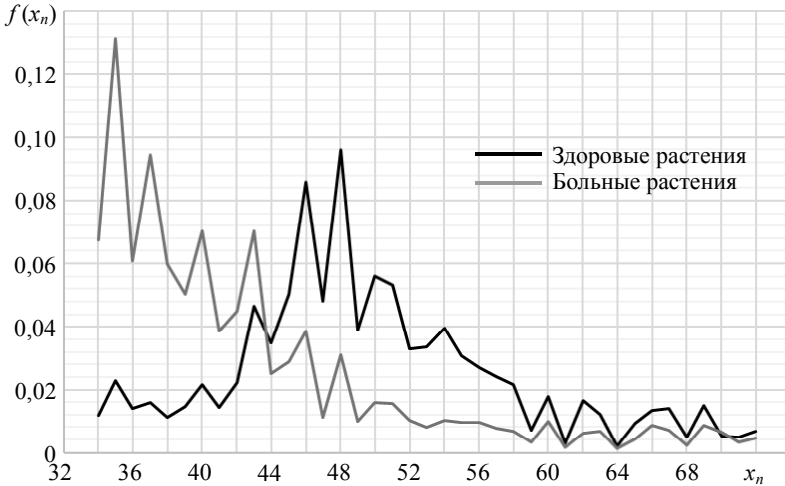


Рис. 2. Зависимость значений признаков от состояния растения

По графику (рис. 2) хорошо видно, что значения признаков для больных и здоровых растений отличаются.

Подсчитаем коэффициентов корреляции между факторами и показателем. Информативность фактора определяется путем сравнения абсолютной величины коэффициента корреляции с пороговым значением:

$$|\rho_{ij}| > I, \tag{2}$$

где  $I$  – задаваемое пороговое значение.

Коэффициент корреляции определяется по формуле

$$\rho_{ij} = \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \right] / \left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_j)^2} \right], \tag{3}$$

где  $\bar{x}$  – оценка первичных моментов  $\bar{x}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n x_{i,j}$ .

При нахождении коэффициентов корреляции необходимо использовать нормированные значения факторов.

По результатам корреляционного анализа признаки  $x_1 - x_9$ ,  $x_{13} - x_{22}$  являются информативными, а признаки  $x_{10}$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{13}$ ,  $x_{23} - x_{39}$  должны быть удалены из выборки.

Проверим эффективность выбранных признаков для распознавания. Разобьем выборку на обучающую и контролирующую таким образом, чтобы процентное соотношение объектов обоих классов в обучающей и контролирующей выборке было равно. С помощью обучающей выборки обучим нейронную сеть.

Применим классификаторы к контролирующей выборке и проверим точность распознавания. Для этого посчитаем ошибки первого ( $q_1$ ) и второго рода ( $q_2$ ). Итоговая ошибка распознавания вычисляется по формуле

$$\varepsilon = (q_1 + q_2) / m \cdot 100 \% . \quad (4)$$

Итоговая ошибка распознавания на контрольной выборке составила 0,092308, следовательно, можно сделать вывод, что использование данных о количестве различных оттенков на изображении может использоваться в качестве признаков для обучения и распознавания.

### Заключение

Для распознавания состояния растения можно использовать данные о количестве оттенков каждого цвета.

Обучение при использовании 131 тестовых изображений дало ошибку 0,09, что является приемлемым результатом для данной задачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Laganiere R. OpenCV 3 Computer Vision Application Programming Cookbook. – Third Edition. – 2017. – 474 p.
3. Горьков А. О цветовых пространствах [Электронный ресурс]. – URL: <https://habrahabr.ru/post/181580> (дата обращения: 26.04.2017).

# РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТА, ПРИВЛЕКАЮЩЕГО ВНИМАНИЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦИИ

*К.В. Шильников*

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Когда человеческий глаз рассматривает окружающую среду, далеко не все её компоненты воспринимаются одинаково. Некоторые фрагменты автоматически выделяются из своего окружения, и зрительная система настраивается на их интерпретацию. В этом случае говорят, что эти области были локализованы фокусом внимания. Подчеркнем, что данный процесс идет не параллельно, а предшествует распознаванию образов.

В самом общем случае выделение фрагментов в сцене происходит в результате взаимодействия двух потоков внимания. Первый, называемый восходящим, представляет распространение информации от низших отделов зрительной системы (рецепторы) к высшим (корковые структуры). Его задача состоит в выявлении наиболее контрастных областей сцены. Второй, или нисходящий, поток анализа протекает в обратном направлении (от высших до низших корковых отделов), и он служит для локализации фрагментов, синтезируемых источником.

В данной работе рассматривается модель, описывающая работу первого потока, выявляющего наиболее информативные и отличающиеся от общего фона области, попавшие на зрительную сцену [1].

## **Алгоритм решения задачи**

Объекты на изображении классифицируются на 2 группы, каждая группа определена конкретными характеристиками:

- 1 группа – объекты, привлекающие внимание;
- 2 группа – объекты, не привлекающие внимание.

Первым этапом поиска объекта, привлекающего внимание, будет вычисление RGB-значений пикселей на изображении и фильтрация изображения фильтром Гаусса. Входное изображение представляет собой трехканальный кадр в цветовой модели RGB.

Фильтрация изображений – это операция вычисления нового значения заданного пикселя, при которой учитываются значения окружающих его соседних пикселей.

Одной из основных задач применения сглаживающих фильтров является шумоподавление, т.е. задача восстановления исходного изображения, к пикселям которого добавлен случайный шум. Изменение шума не зависит от пикселя к пикселю, и если учитывать, что математическое ожидание значения шума равно 0, то шумы соседних точек смогут компенсировать друг друга. Чем больше размер окна фильтрации, тем меньше будет усредненная интенсивность шума, несмотря на это, произойдет и весомое размытие некоторых значащих деталей на изображении.

Обычно удаление шума на изображении производится посредством применения фильтра Гаусса [2]. Функция Гаусса для двумерного случая

$$K(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

Метод, составляющий ядро фильтра размером size с параметром  $\sigma$ :

```
GausFiltKern(size,  $\sigma$ ) :=
  Shift  $\leftarrow$  floor(size/2)
  for  $y \in 0 \dots \text{size}-1$ 
  for  $x \in 0 \dots \text{size}-1$ 
     $M_{x,y} \leftarrow G\_gen(x - \text{Shift}, y - \text{Shift}, \sigma)$ 
  return M
```

Матрица размером  $5 \times 5$  при  $\sigma = 1,4$  будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{A}.$$

Здесь  $\mathbf{A}$  – изображение до применения фильтрации;  $\mathbf{B}$  – сглаженное изображение; 159 – это коэффициент нормирования, для того чтобы средняя интенсивность оставалась неизменной. Перед тем как начать

работу с алгоритмом  $k$ -means, исходное изображение следует предварительно уменьшить.

Следующим этапом нахождения объекта будет определение доминирующих цветов на изображении, используя метод  $k$ -means [3]. Таким образом, решение поставленной задачи в целом заключается в выявлении множества кластеров цветов на исходном изображении. Как известно, идея метода  $k$ -средних состоит в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек выборки от центров кластеров.

### Математическое описание алгоритма $k$ -means:

#### 1. Задание начальных центров масс:

- На этом этапе задаются случайным образом начальные значения центров масс  $\mu_1^1, \dots, \mu_k^1$ .

#### 2. $i$ -й шаг итерации:

- *Распределение элементов по кластерам.* На данном шаге каждый элемент  $x_i \in X$  определяется в свой кластер  $S_j^t$  так, что:

$$l_i^t = \arg \min_j (d(x_i, \mu_j^t))^2, \quad j = 1, \dots, k; \quad i = 1, \dots, n.$$

- *Вычисление новых значений центров масс кластеров.* На этом шаге происходит пересчет значений центров масс кластеров, полученных на предыдущем шаге:

$$\mu_1^{t+1} = \frac{1}{|S_1^t|} \sum_{x \in S_1^t} x.$$

#### 3. Условие остановки алгоритма:

- $\mu_i^t = \mu_i^{t+1}$  для всех  $i = 1, \dots, k$ .

Вычислительным ядром алгоритма является шаг 2, который содержит данные этапы:

- распределение элементов по кластерам;
- вычисление новых значений центров масс кластеров.

При работе над выявлением доминирующих цветов на изображении каждая точка изображения предполагается как точка в трёхмерном пространстве RGB, в которой определяется значение расстояния до центра масс каждого кластера. По завершении данного этапа формируется множество доминирующих цветов. Сопоставим каждый пиксель изображения соответствующему кластеру, полученному на предыдущем этапе.

Далее формируется изображение из пикселей доминирующих цветов, находятся связанные области и вычисляются значения их площадей. Ввиду того, что объект, привлекающий внимание чаще всего, значительно выделяется от общего фона и имеет меньшую площадь чем фон, то считается, что объект, привлекающий внимание, не может состоять из самого доминирующего цвета на изображении. Находится отношение площади найденной связанной области к общей площади изображения и полученное отношение сравнивается с порогом. В данной работе в качестве порога выбирались минимальное значение 0,1 и максимальное значение 0,3. Если отношение входит в данный интервал, то считается, что найденная область содержит в себе объект привлекающий внимание. Результат работы алгоритма представлен на рис. 1.



Рис. 1. Результат работы алгоритма: *а* – исходное изображение, *б* – объект, привлекающий внимание

Таким образом, алгоритм распознавания будет содержать в себе следующие шаги:

- 1) Применение фильтра Гаусса на изображение.
- 2) Вычисление кластеров доминирующих цветов на изображении.
- 3) Замена цветов пикселей на цвета доминирующих цветов.
- 4) Нахождение связанных областей на изображении и вычисление их площадей.
- 5) Сравнение отношения площади области к площади всего изображения с пороговым значением.
- 6) Выделение объекта, привлекающего внимание.

Блок-схема алгоритма распознавания представлена на рис. 2.

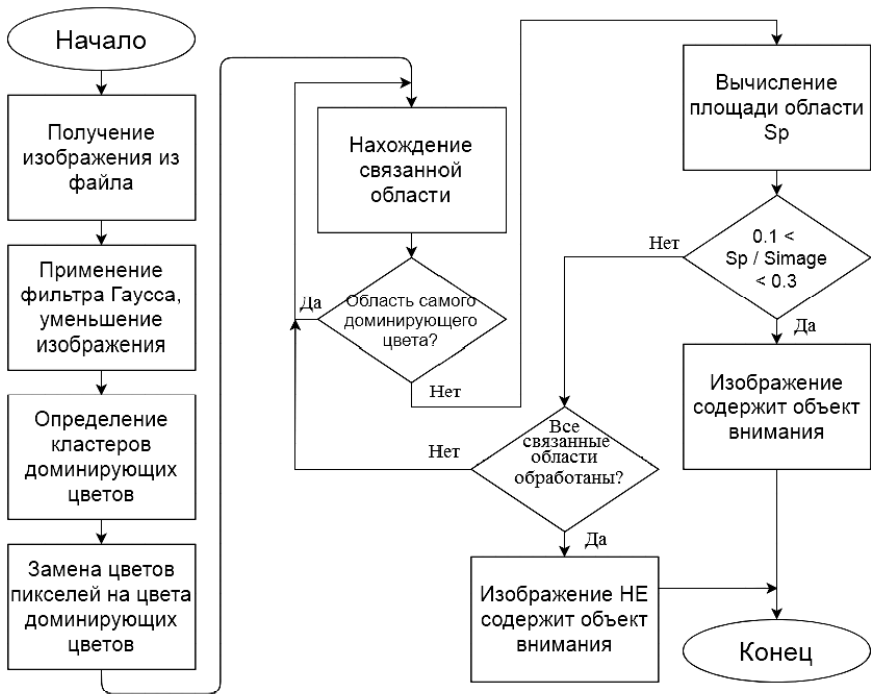


Рис. 2. Блок-схема алгоритма распознавания

### Заключение

Объект, привлекающий внимание, в данном случае успешно находится и выделяется на исходном изображении. В ходе исследования были использованы особенности цветового пространства RGB и изучен метод поределения доминирующих цветов методов кластеризации  $k$ -means.

Из 30 тестовых изображений алгоритм сработал корректно на 24 изображениях, на 6 изображениях алгоритм сработал некорректно. Точность детектирования составляет 80 %. Невысокую точность детектирования можно объяснить тем, что само понятие объекта, привлекающего внимание, весьма субъективно, и соответственно в будущем для улучшения работы алгоритма стоит уделить внимание определению начальных центров исходных кластеров цветов изображения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьяница А.А., Шишкин А.Г. Цифровая обработка видеоизображений. – М.: Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. – 518 с.
2. Путьгин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
3. Научно-популярный ресурс Робокрафт [Электронный ресурс]. – URL: [www.robocraft.ru/blog/computervision/1061.html](http://www.robocraft.ru/blog/computervision/1061.html)



# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

## **DATA STRUCTURING AND DATA PROCESSING FOR THE INFORMATION INTELLECTUAL APPLICATIONS**

*R. Burnashev, N. Yalkaev, V. Georgiev*

*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

### **Introduction**

This paper outlines one of the methods of textual information structuring. In addition, this type of structuring is also provides the ability of using of the main methods and techniques of software testing.

The relevance of the work is based on creating a system that can interact with MS Word files, convert, and store data in a database, visualize and work with them in a user interface.

This article provides the process of application development using modern web technologies such as Visual C#. This tool is based on the view of template docx-file, object-relational database management system PostgreSQL.

One of the main problems that must be solved by client-server application is the import of Resume templates stored in Microsoft Word documents into the corresponding database tables and their subsequent processing using Database Management Systems (DBMS) environment.

The developed program is necessary for MS Word data processing, encryption, and their presentation. Data processing is a form for data editing. Necessary encryption is used to protect data transfer process. Representation is the visualization of data and their possible filtration.

Storing information in a database provides a great opportunity to manipulate the data. Filtration of a database queries allow a manipulation of the data as developer wants and visualization queries results. Structuring the data source can produce decomposition and lead them to a more convenient form. This approach also simplifies the data searching. If necessary, the data transfer from one user (or server) to another may be accompanied by strong encryption.

## Methods of research

To implement this task, an object-oriented programming language (OOPL), Visual C#, was used. The Resume interface was designed by means of this language.

Visual Studio 2015 is one of the most popular and effective tools for the development of complex software that can integrate MS Office applications into our project. The OOPL Visual C# provides an opportunity to access objects by accessing their methods and receiving and setting their properties.

## Analysis

To develop interface for importing resume pattern data stored in MS Word document into DBMS, it is necessary to solve a series of subtasks using C#, including:

- Choose MS Word resume template.
- Fill the fields with Client part of the application.
- Save a new resume with encrypted data.
- Import encrypted data by Server part of the application.
- Manage the necessary data stored in DBMS (PostgreSQL).

Connection with MS Word by the C# tools is carried out as follows:

Initially the variable «var Application: variant» is announced.

Then, it is necessary to create an OLE object «Word.Application», and assign it to the variable.

```
public void Init()
{
    Word.Document Doc = Word.Documents.Add(Application.StartupPath +
        "\\DATA\\Resume_Template.doc");
        SetTemplate(Doc);
}
```

This procedure is called creating a server instance.

Open an existing document (MS Word test pattern) after creating a server instance to import it into the database.

To Import MS Word document (CV template) documents into a PostgreSQL database management system, a corresponding algorithm should be created. Let's consider the hierarchy of OLE methods and the properties of the OLE object. In its simplest form (Fig. 1), the import process can be represented as follows:

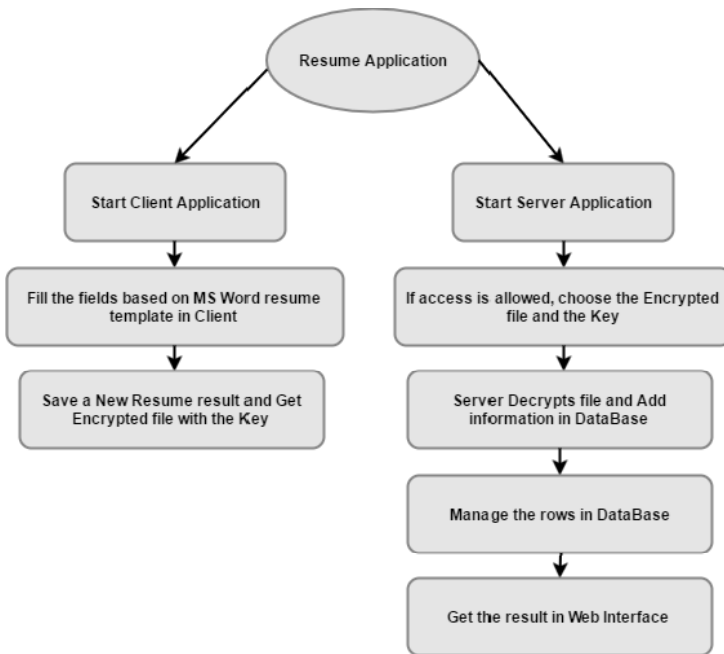


Fig. 1. Process of importing a Resume document into a database

## Results

In the software product, the object of the application contains a collection of Resume templates (a collection of keywords), and if while reading the document, the keyword correct answer» is found, the correct answer will be automatically added into the key field. This process continues until the entire file is completely read.

After all necessary steps the program disconnects from the server and completes the import of information from the MS Word Resume document into the PostgreSQL database.

A practical result of this report is the development of a new software tools providing the import of Microsoft Word documents into PostgreSQL databases. The basic steps necessary for structuring data and post-processing databases are shown below: template MS Word Resume (Fig. 2), Resume creator (Fig. 3,4), Resume Server (Fig. 5) subsequent selection of the template to import into the database (Fig. 6 – 8).

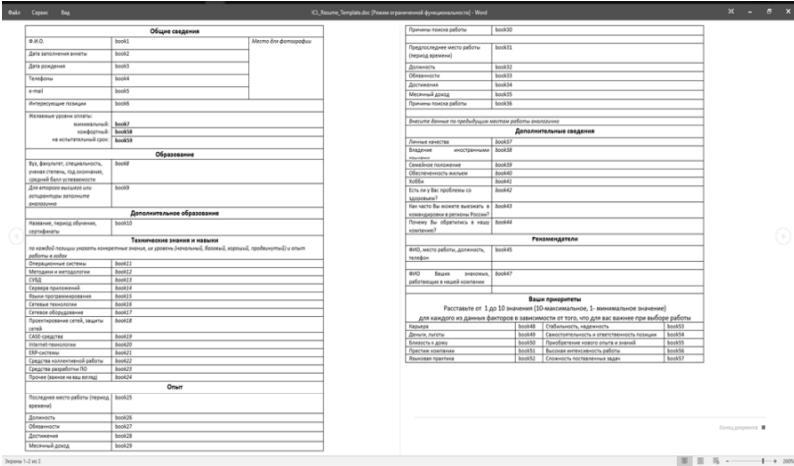


Fig. 2. MS Word template

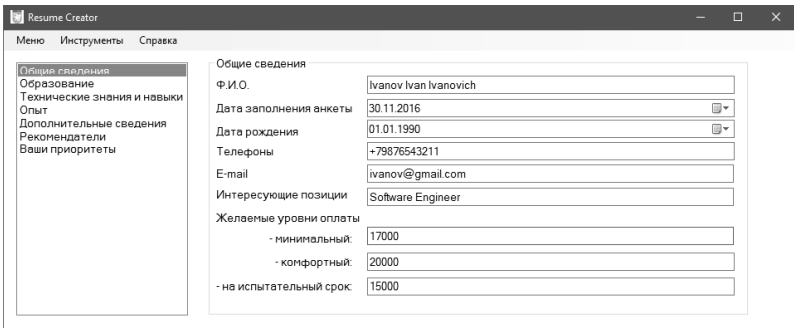


Fig. 3. Resume creator

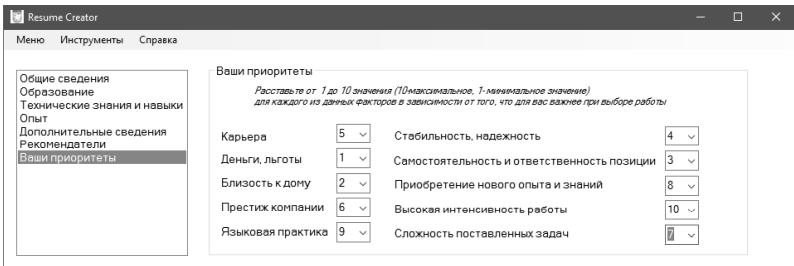
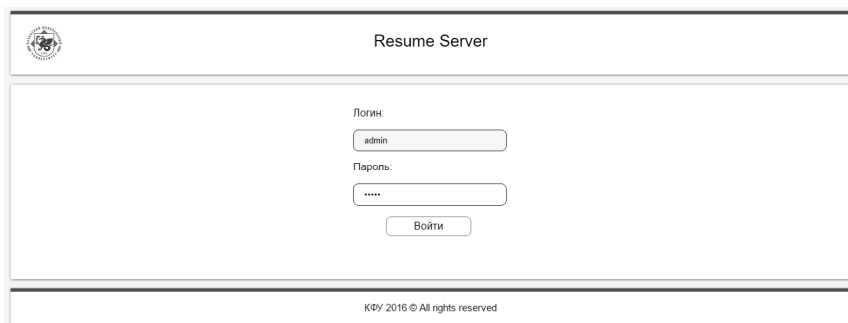


Fig. 4. Resume creator



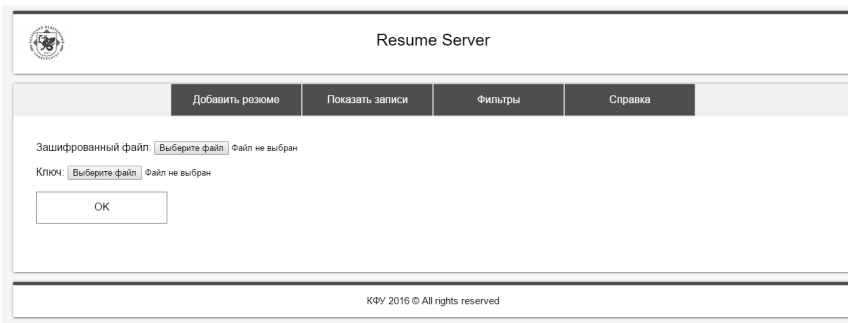
Resume Server

Логин:

Пароль:

КФУ 2016 © All rights reserved

Fig. 5. Resume Server



Resume Server

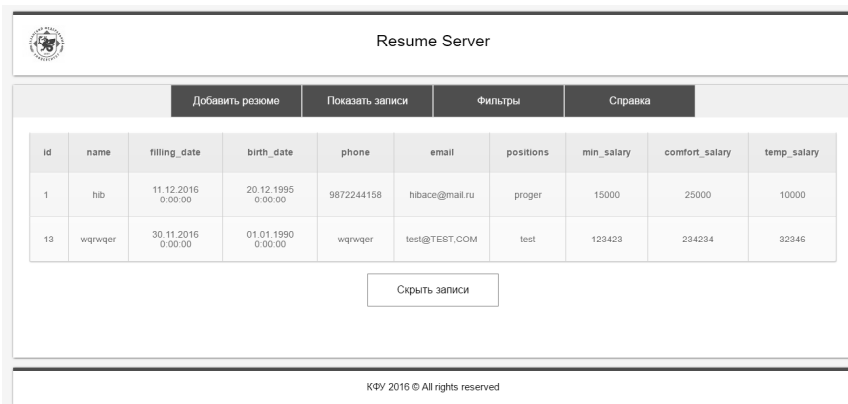
Добавить резюме    Показать записи    Фильтры    Справка

Зашифрованный файл:  Файл не выбран

Ключ:  Файл не выбран

КФУ 2016 © All rights reserved

Fig. 6. MS Word file Import into the Database




Resume Server

Добавить резюме    Показать записи    Фильтры    Справка

id	name	filling_date	birth_date	phone	email	positions	min_salary	comfort_salary	temp_salary
1	hib	11.12.2016 0:00:00	20.12.1995 0:00:00	9872244158	hibace@mail.ru	proger	15000	25000	10000
13	wqrvqer	30.11.2016 0:00:00	01.01.1990 0:00:00	wqrvqer	test@TEST.COM	test	123423	234234	32346

КФУ 2016 © All rights reserved

Fig. 7. MS Word file Import into the Database


Resume Server

Добавить резюме
Показать записи
Фильтры
Справка

Показать записи

Скрыть записи

Удалить по ID

id	name	filling_date	birth_date	phone	email	positions	min_salary	comfort_salary	temp_salary
1	hib	11.12.2016 0:00:00	20.12.1996 0:00:00	9872244158	hibace@mail.ru	proger	15000	25000	10000
13	wqpwqer	30.11.2016 0:00:00	01.01.1990 0:00:00	wqpwqer	test@TEST.COM	test	123423	234234	32346

КФУ 2016 © All rights reserved

Fig. 8. MS Word file Import into the Database

## Conclusion

Based on the approach presented in this paper, resume structuring has been carried out, and an client-server application providing for the import of Resume doc templates, through which a software product runs and compares each sample with a keyword in the table, has been developed. As a result, classification in the system will be revealed.

The implementation of the methods facilitates data processing and data structuring. This process is one of the important nowadays.

Considered algorithm is implemented using the Visual Studio development environment and the necessary libraries.

## REFERENCES

1. *Salahaldin Juba, AchimVannahme, AndreyVolkov*. Learning PostgreSQL. – Packt Publishing Ltd, 2015.
2. *Jeremy Keith*. HTML5 for Web Designers. – A Book Apart, 2015.
3. *Dan Cederholm*. CSS3 for Web Designers. – A Book Apart, 2014.

## СИСТЕМА ТЕРАГЕРЦОВОГО ВИДЕНИЯ

*А.И. Бердюгин, В.Ю. Выговский*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследование электрофизических свойств материалов является ключевой задачей современной науки. Одним из перспективных направлений таких исследований является диагностика неоднородных сред. Данные исследования могут быть направлены на выявление скрытых включений и дефектов, а также установление их природы. Сегодня остро стоит проблема быстрой и безопасной бесконтактной диагностики различных сред. Проект направлен на создание системы, которая позволит производить сканирование материалов в терагерцовом диапазоне частот.

Современные широко применяемые методы диагностики используют технику, работающую в инфракрасном, ультрафиолетовом, а также рентгеновском диапазонах частот. Данные методы имеют существенный недостаток – отрицательное влияние на биологические объекты. Актуальным становится вопрос использования терагерцового излучения в качестве альтернативы применяемым методам [1–3]. Опираясь на труды [2, 4–6], авторы сделали вывод, что основными достоинствами терагерцовой диагностики является то, что большинство характерных спектральных особенностей различных сред, а также спектры инородных включений попадают именно в терагерцовый диапазон. Немаловажным является и тот факт, что терагерцовое излучение не обладает вредными для биологических объектов факторами [7].

Существенным недостатком терагерцовой диагностики является необходимость осуществления перемещения исследуемого объекта относительно пучка электромагнитного излучения. Одним из путей решений данной проблемы является создание универсальной системы автоматического двумерного сканирования материалов в терагерцовом диапазоне частот, блок-схема которой представлена на рис. 1. В качестве прецизионных приводов системы сканирования используются биполярные шаговые двигатели. Обмотки данных двигателей переключаются с помощью силового модуля управления ключами, представляющего собой схему Н-мостов с гальванической развязкой оптопарами в цепи управления. Питание механизма осуществляется от источника постоянного

напряжения 12 В. Система оснащена обратной связью в виде датчиков начального (нулевого) положения образца. Сбор информации и управление системой производился двенадцатиразрядным аналого-цифровым преобразователем, в роли которого применялся модуль ввода-вывода E-154 фирмы «L-card» (Россия). Через аналоговый вход модуля организована линия связи с детектором спектрометра. Она предназначена для записи значения интенсивности излучения, пройденной через образец.

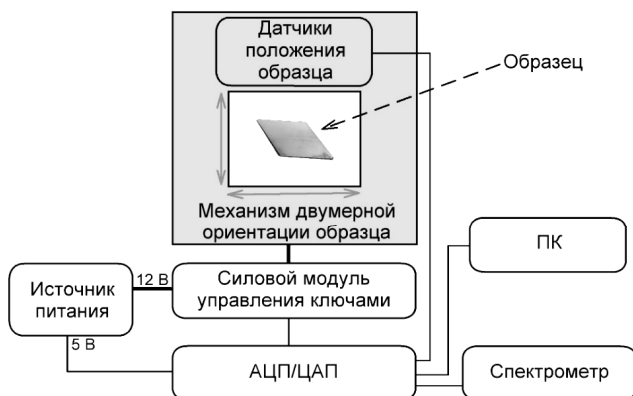


Рис. 1. Блок-схема терагерцевой системы сканирования скрытых неоднородностей материалов

В среде программирования LabVIEW была написана программа для управления системой автоматической двумерной регистрации электрофизических свойств материалов. Программа обладает функционалом, описанным ниже. Прежде всего имеется возможность ввода параметров диагностики: координаты позиции, с которой начинается процесс сканирования ( $X$ ,  $Y$ ), размера области сканирования по вертикали и горизонтали (Макс. $X$ , Макс. $Y$ ), величины шагов по осям  $X$  и  $Y$ . К тому же после окончания сканирования, либо принудительной остановки программы, предоставляется возможность сохранить полученные результаты в файл. В созданный файл автоматически добавляется информация о введённых параметрах сканирования. Программа оснащена функцией пересчёта результатов по введённой в неё формуле. Для наглядности, в процессе диагностики и по её завершению результаты сканирования отображаются с помощью графика интенсивности. На рис. 2 представлен алгоритм программы.



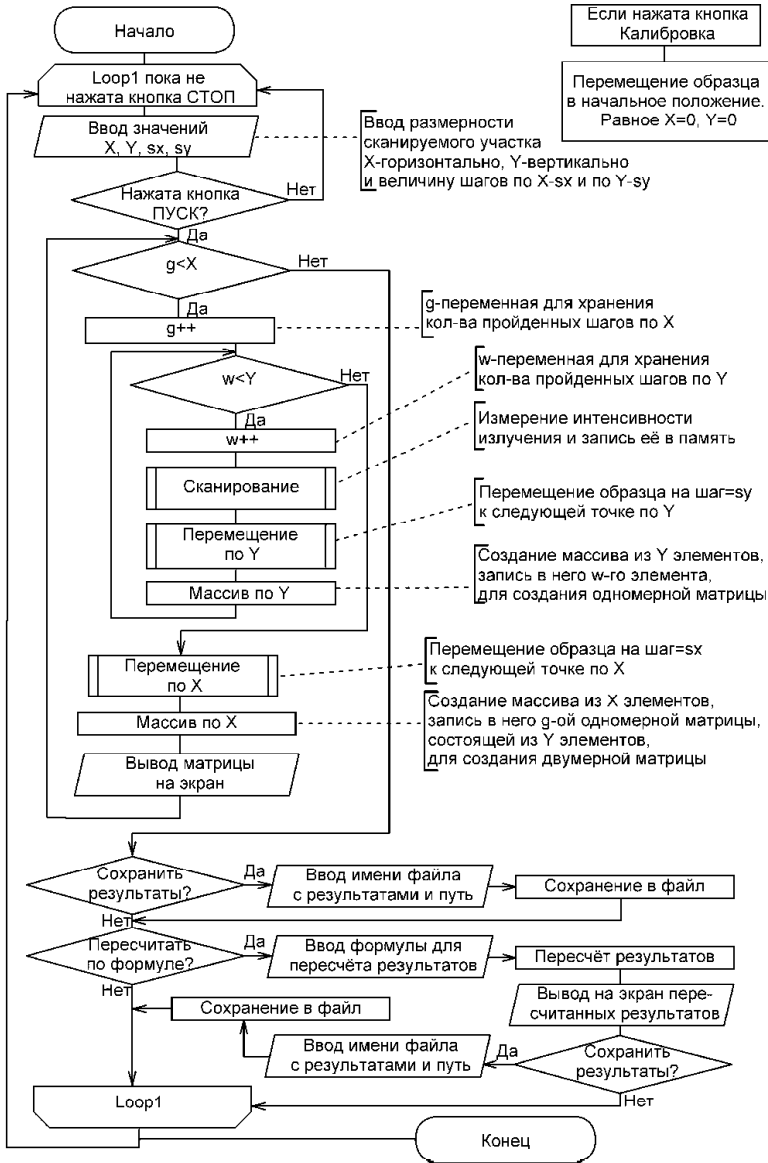


Рис. 2. Блок-схема программы управления системой сканирования скрытых неоднородностей материалов



В программе предусмотрено диалоговое окно для подсказок пользователю и сообщений о работе системы. Управление программой осуществляется путём нажатия на кнопки пуск, стоп и калибровка. При выборе калибровки система перемещает образец в начальное (нулевое) положение. На рис. 3 представлена лицевая панель программы.

Апробация системы была произведена в центре коллективного пользования «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» Национального исследовательского Томского государственного университета.

Система сканирования скрытых неоднородностей материалов была интегрирована в тракт терагерцового спектрометра СТД-21. На рис. 4 приведена схема тракта данного квазиоптического спектрометра на основе интерферометра Маха – Цандера с механизмом двумерной ориентации образца для исследования электрофизических свойств материалов в КВЧ- и ГВЧ-диапазонах.

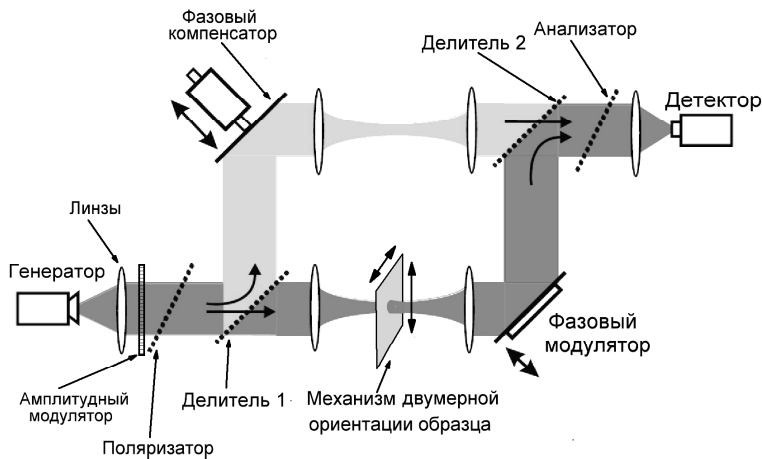


Рис. 4. Схема квазиоптического тракта спектрометра с механизмом двумерной ориентации исследуемых образцов материалов

Были произведены серии экспериментов с использованием следующих материалов: образец № 1 – диэлектрический слой (лист бумаги) толщиной 100 мкм с нанесенными графитом текстом, поверх заклеенными малярным скотчем (рис. 5); образец № 2 – лист бумаги с тремя различными фигурами, которые нарисованы графитовым стержнем и

закрашены маркером (рис. 6). Оба образца были размещены на оргстекле. На рис. 7 и 8 показаны графики интенсивности пройденного излучения (напряжение с выхода детектора) образцов № 1 и 2 соответственно. Как видно из графиков, пространственная разрешающая способность (20 пикселей/мм) сканирующей системы обеспечивает достаточную детализацию для определения границ неоднородностей.



Рис. 5. Внешний вид образца № 1

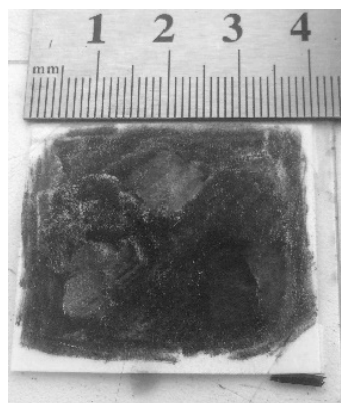


Рис. 6. Внешний вид образца № 2

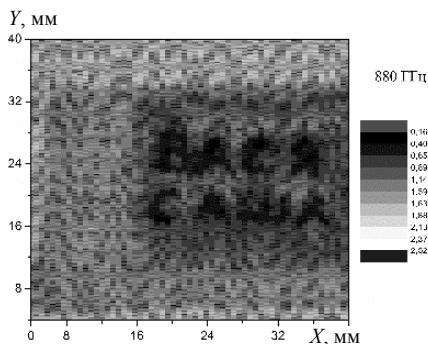


Рис. 7. График интенсивности для образца № 1

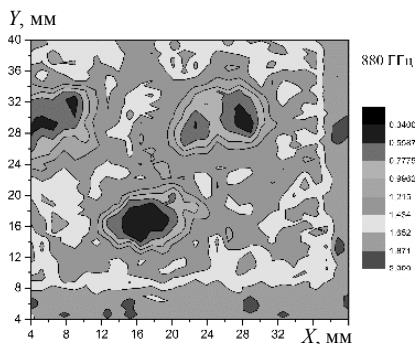


Рис. 8. График интенсивности для образца № 2

Место реализации проекта – лаборатория терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета. В будущем авторами планируется увеличение области

сканирования за счет изменения конструкции направляющих для двигателей механизма ориентации, а также замена самих двигателей на более прецизионные. Следующим шагом планируется исследование плоскопараллельных образцов горной породы с целью определения их состава. При успешном завершении исследований авторы рассмотрят возможность подачи патента на полезную модель и поиск организаций, заинтересованных в совместной работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Власов М.Ю.* Автоматизация исследований нелинейных кристаллов методом терагерцовой спектроскопии. – 2016.
2. *Скрыль А.С., Царев М.В.* Применение терагерцового излучения для исследования предметов искусства: электронное методическое пособие. – Н. Новгород: ННГУ, 2011. – 39 с.
3. *Казаринов К.Д.* Биологические эффекты электромагнитного поля терагерцового диапазона // Электронная техника. – 2009. – Т. 1. – С. 48–58
4. *Казаринов К.Д.* Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. – М.: ВИНТИ, 1990. – Т. 27. – 102 с.
5. *Назаров М.М. и др.* Терагерцовая импульсная спектроскопия биологических тканей // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 7. – С. 647–654.
6. *Запара Т.А.* Влияние терагерцового (субмиллиметрового) лазерного излучения на проницаемость клеточных мембран. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010.
7. *Чекрыгин В.Э.* Терагерцовый диапазон на страже здоровья // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – Т. 96. – № 7.

## **РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «ДВЕХPERT» ПО ПОДБОРУ СУБД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

***Р. Бурнашев, М. Морозова, А. Мистриков, В. Георгиев***

*Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия*

Эволюция информационных технологий и систем все в большей степени определяется их интеллектуализацией. Интеллектуальные информационные системы и технологии – одна из наиболее перспективных и быстро развивающихся научных и прикладных областей информатики. Она оказывает существенное влияние на все научные и технологические направления, связанные с использованием компьютеров, и уже сегодня дает обществу то, что оно ждет от науки – практически значимые результаты, многие из которых способствуют кардинальным изменениям в сферах их применения [1].

Экспертными системами называют сложные программные комплексы, аккумулирующие знания специалистов в конкретных предметных областях и тиражирующие этот эмпирический опыт для консультаций менее квалифицированных пользователей [2].

Прототип экспертной системы, получивший название «ДВЕхpert», предназначен для помощи разработчикам в выборе системы управления базами данных (СУБД) при разработке программного продукта. Такая система, по крайней мере в свободном доступе, на данный момент отсутствует. Однако сама задача выбора СУБД под каждый конкретный проект далеко не тривиальна. Сложность заключается в большом количестве особенностей, присущих каждой СУБД. При этом для получения знаний об этих особенностях необходимо уделить немалое количество времени на изучение литературы и освоить на практике каждую базу. К тому же данная сфера динамична, и знания должны сохранять актуальность.

Количество информации в данной сфере, таким образом, весьма велико, и одному человеку, да и команде экспертов очень сложно собрать её для принятия решения по конкретному проекту. В результате чаще всего СУБД для программного продукта выбирается из нескольких известных экспертам вариантов и может быть неоптимальной. Поэтому

создание подобной экспертной системы и соответствующие исследования являются весьма актуальными.

В этой работе мы ограничиваемся относительно небольшим, но значимым набором характеристик СУБД. За основу берем реализуемую СУБД-модель представления данных, а также связанные с этим свойства доступности (availability) и согласованности (consistency) данных, возможности их распределенного хранения; транзакционные свойства системы, свойства гибкости схемы данных и запросов к ним, наличия единых точек отказа системы.

### **Материалы и методы**

Для решения поставленной задачи была выбрана следующая последовательность действий:

1. Выявление значимых факторов для выбора системы управления базами данных разработчиком.
2. Приблизительная структуризация выявленных факторов.
3. Выбор подмножества факторов для прототипа базы знаний и их структуризация. Было решено ограничиться некоторой частью факторов, поскольку полная структуризация большого количества факторов – задача, требующая отдельного исследования.
4. Реализация базы знаний и прототипа экспертной системы на языке SWI-Prolog с использованием графической библиотеки XPCE.

Для выявления значимых факторов в выборе СУБД мы изучили мнения и опыт решения подобных задач экспертами предметной области и соответствующую литературу. Для изучения мнений было решено провести беседы с экспертами, рассмотреть документы об их решениях в данной области и характеристики, рассматриваемые в них.

Для разработки прототипа экспертной системы был выбран язык программирования SWI-Prolog, так как язык Prolog предназначен для задач работы с базами данных и знаний и имеет встроенные инструменты для работы с ними, SWI-Prolog является открытой реализацией Prolog. Для разработки графических приложений в дистрибутив SWI-Prolog включены средства, позволяющие разрабатывать графический интерфейс пользователя. Таким средством в составе SWI-Prolog'a является XPCE.

XPCE – это платформи-независимый инструментальный для SWI-Prolog'a, Lisp и других интерактивных динамически типизируемых язы-

ков программирования. Наибольшую популярность этот фреймворк получил именно в языке Prolog.

Для того чтобы ядро SWI-Prolog'a могло взаимодействовать с объектами XPCЕ и управлять ими из своей среды, в SWI-Prolog добавлены несколько предикатов [3], основные из которых показаны в таблице.

#### Основные предикаты в SWI-Prolog

Наименование предиката	Значение
new(?Reference, +Class(...Arg...))	Создает новый объект как экземпляр одного из классов XPCЕ (Class) с набором аргументов, используемых для инициализации объекта. Новому экземпляру объекта может быть присвоен указатель, доступный по ссылке (Ref-erence) из SWI-Prolog'a
send(+Reference, +Method(...Arg...))	Позволяет для объекта, которой указан ссылкой на него (Reference), вызвать нужный метод (Method) с требуемыми значениями аргументов
get (+Reference, +Method(...Arg...), -Result)	Позволяет для объекта, указанного ссылкой (Reference), получить значения ряда параметров (Result), определенных в качестве аргументов (Arg) конкретного метода (Method)
free(+Reference)	Уничтожает объект, указанный ссылкой на него

#### Результаты и их обсуждение

Факторы были приблизительно структурированы следующим образом:

- задача;
- модель данных СУБД и исходящие из нее свойства;
- особенности разработки с использованием конкретной СУБД, среда работы СУБД;
- финансовые затраты при использовании СУБД;
- специфические свойства.

Для разработки прототипа были выбраны часть структуры, представляющая модель базы данных, и исходящие из нее свойства. Раздел «Задача», как указано ранее, является более высокоуровневым и базируется отчасти на иных разделах структуры, поскольку помимо уже существующих типовых решений, которые можно хранить в соответствующей базе знаний, включают спецификации различных задач, соответствие конкретных систем которые необходимо проверять с использованием баз знаний иных разделов. Раздел, связанный с особенностями разработки под СУБД, включает в основном сложности выявления



конкретных верных и относительно полных данных о каждой СУБД и подбора удобной структуры данных для их хранения. Аналогичная ситуация складывается в разделе финансовых затрат.

Специфические свойства – это набор редких данных, владение которыми очень эффективно в редких случаях и мало полезно в остальных. «Модель данных базы и исходящие из нее свойства» является достаточно стройным разделом.

Описав данные из него в форме фактов и правил вывода, можно получать большое количество данных о системе управления базами данных на основании небольшого количества фактов. Поэтому данный раздел был выбран для дальнейшей разработки прототипов базы знаний и экспертной системы.

Для реализации прототипа базы знаний и экспертной системы были осуществлены следующие действия:

- рассмотрена и упрощена под задачу типичная структура экспертной системы;
- реализована упрощенная структура «DBExpert»;
- добавлена структурированная база знаний;
- реализован упрощенный интерфейс поиска по базе знаний;
- реализована возможность внесения данных согласно существующей структуре в базу знаний.

Поскольку в данном исследовании интерес представляют преимущественно база знаний и вывод из нее, структура системы «DBExpert» была упрощена и включила следующие компоненты:

- базу знаний;
- рабочую память, называемую также базой данных (SWI-Prolog);
- интерпретатор (SWI-Prolog);
- компонент приобретения знаний;
- интерфейс пользователя.

## **Выводы**

Полученный в результате проведенного исследования прототип «DBExpert» выглядит следующим образом. База знаний реализует приведенную выше структуру взаимодействия факторов выбранного для прототипа раздела «модель данных СУБД и исходящие из нее свойства».

Для вывода на данной базе знаний используется механизм вывода, включенный в реализацию SWI-Prolog (листинг кода 1).

**Прототип базы знаний для раздела «модель данных СУБД  
и исходящие из нее свойства»**

```

% MODELS
object_relational('PostgreSql').
document_oriented('MongoDB').
relational('MySQL').
relational('Oracle Database').
relational('Microsoft SQL Server').
relational('IBM DB2').
key_value('Redis').
key_value('Riak').
column_oriented('HBase').
document_oriented('CouchDB').
grafp('Neo4J').
relational('SQLite').
nosql(X) :- key_value(X); column_oriented(X); docu-
    ment_oriented(X); grafp(X).
% DATA
% Big data
big_data(X) :- nosql(X).
consistent(X) :- relational(X).
available(X) :- relational(X).
partition_tolerante(X) :- nosql(X).
% BASE
base(X) :- nosql(X).
basic_available(X) :- base(X).
basic_available(X) :- available(X). % includes
eventually_consistent(X) :- base(X).
eventually_consistent(X) :- consistent(X). % includes
soft_state(X) :- base(X).

```

Реализованный с помощью библиотеки XPCE интерфейс к данной базе знаний показан на рис. 1 и представляет меню прототипа экспертной системы.

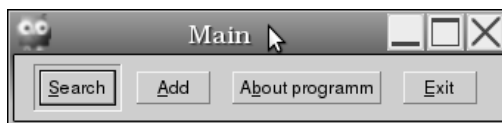


Рис. 1. Главное меню прототипа «DBExpert»

Исходя из выбранного пользователем сочетания необходимых свойств, система находит и выводит список СУБД. Результаты произведенного поиска представлены на рис. 2.

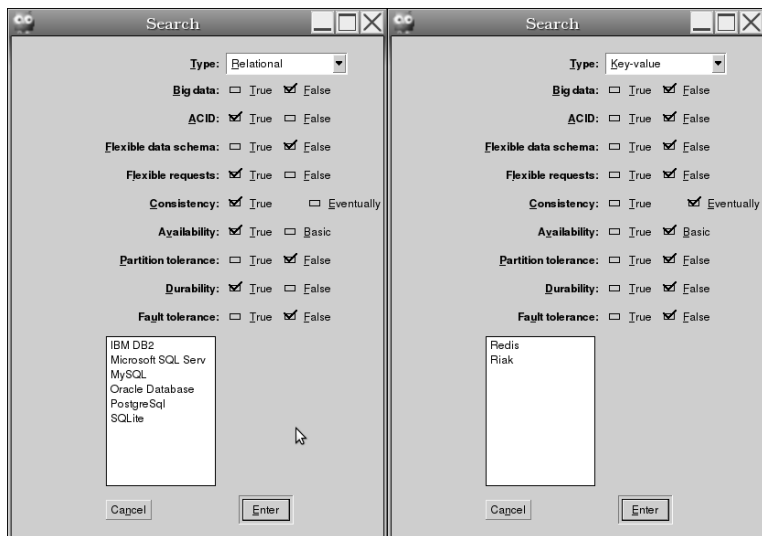


Рис. 2. Результаты поиска по базе знаний

## Заключение

Прототип экспертной системы «DBExpert» реализует также компонент приобретения знаний. База знаний включает в себя те данные о базе, которые отмечены при добавлении как присутствующие. Система производит запись результатов на диск и автоматически обновляет подключение базы знаний, что позволяет пользоваться результатами добавления в той же сессии работы с системой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тоискин В.С. Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие. – Ставрополь: Изд-во СГПИ, 2009. – Ч. 1. – С. 3.
2. Буров К. Обнаружение знаний в хранилищах данных // Открытые системы. – 1999. – № 5–6. – С. 67–77.
3. Хабаров С.П. Интеллектуальные информационные системы. PROLOG – язык разработки интеллектуальных и экспертных систем: учебное пособие. – СПб.: СПбГЛТУ, 2013. – С. 47.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОДА

*Д.Н. Галанин, В.О. Георгиев*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

В программировании довольно часто возникает задача переписывания существующего программного кода, реализующего некий алгоритм, с одного языка программирования на другой. В связи с этим, целесообразно автоматизировать эту задачу (хотя бы частично, в рамках синтаксиса языков).

Для этого рассмотрим понятие абстрактного синтаксического дерева.

Абстрактное синтаксическое дерево – это конечное, помеченное, ориентированное дерево, в котором внутренние вершины сопоставлены с операторами (также функциями и т.п.) языка программирования, а листья – с соответствующими операндами (рис. 1). Таким образом, листья являются пустыми операторами и представляют только переменные и константы.

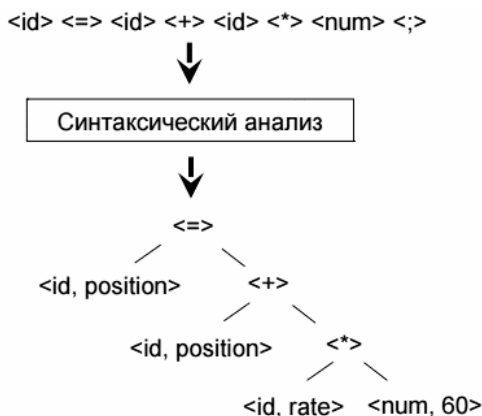


Рис. 1. Пример AST-дерева

Как можно видеть, AST-дерево представляет собой структурное представление исходной программы, очищенное от элементов конкретного синтаксиса (на рис. 1 в AST-дерево не попал «разделитель», так

как он имеет отношение не непосредственно к семантике данного фрагмента программы, а лишь к конкретному синтаксису языка). В качестве узлов в AST-дереве выступают операторы, к которым присоединяются их аргументы, которые, в свою очередь, также могут быть составными узлами.

### Структура «Преобразователя»

Структурно «Преобразователь» состоит из двух компонентов (точнее, категорий компонентов):

1. Лексические анализаторы, они же фронтенды от англ. front-end (свой для каждого исходного языка), преобразующие программу на исходном языке в AST.

2. Генераторы кода, они же бакенды от англ. back-end (свой для каждого целевого языка), преобразующие AST в программу на целевом языке.

Подобной архитектурой обладают многие современные компиляторы (GCC, Clang и др.), которые таким образом генерируют машинный код для различных архитектур (x86, x86\_64, ARM и т. п.).

Кроме того, «Преобразователь» включает в себя библиотеку для работы с общими структурами (AST и др.), программу-драйвер (автоматически вызывающая компоненты для нужных языков), а также прочие вспомогательные компоненты (рис. 2).

Разделение на «клиентскую» (front-end) и «серверную» (back-end) части позволяет «переводить» исходные коды программ между любыми поддерживаемыми языками.

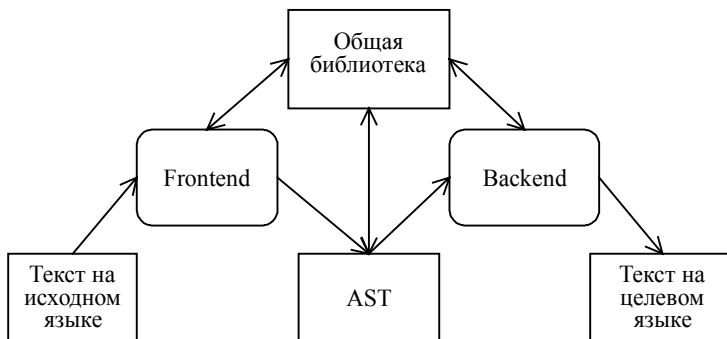


Рис. 2. Схема работы «Преобразователя»

## Реализация

### Технологии и инструменты

Для реализации был выбран язык программирования Kotlin. Это связано с тем, что:

1. Платформа JVM предоставляет готовые средства для многих «рутинных» задач, что избавляет от необходимости как написания их собственных реализаций, так и подключения сторонних библиотек.

2. JVM доступна на всех основных платформах и архитектурах (Linux, Microsoft Windows, macOS, BSD и др.). Реализация OpenJDK доступна под свободной лицензией.

3. Системы сборки для JVM (такие, как используемая в данной системе Gradle, а также Maven, Ant и т. д.) предоставляют удобные средства управления зависимостями проектов (в том числе загрузку их из сети Интернет), что значительно облегчает сборку проекта из исходных текстов и его развертывание на машине пользователя.

4. Язык Kotlin, разрабатываемый компанией JetBrains, не только полностью совместим с Java (и библиотеками для нее), но и значительно проще по синтаксису, чем сама Java. Однако это никак не отменяет возможности написания кода на других JVM-языках (собственно Java, а также Scala и т. п.)

5. JVM является основной платформой для библиотеки *ANTLR4* (см. ниже).

*ANTLR4* – библиотека для генерации синтаксических и лексических анализаторов непосредственно из описания грамматики (в формате, аналогичном EBNF); эти описания для многих языков доступны в сети Интернет под свободными лицензиями, что позволяет адаптировать их для проекта, не создавая «с нуля». Хотя данная библиотека портирована на множество целевых платформ (в том числе .NET), основной платформой для нее остается JVM.

В качестве системы сборки в проекте используется Gradle. Каждый компонент «Преобразователя» оформлен в виде отдельного Gradle-подпроекта, что существенно упрощает подключение к нему сторонних модулей (для языков программирования и т. п.)

На момент написания данной работы в качестве сторонних библиотек к проекту подключены только Kotlin и *ANTLR4* (доступные в репозиториях Maven/Gradle), в связи с чем задача развертывания проекта сводится лишь к наличию Java Development Kit 1.8 (OpenJDK/Oracle JDK) на целевой машине и последующей сборке проекта из исходных текстов.

## Возникающие проблемы

### Стандартные библиотеки языков

Различные языки программирования обладают разными наборами функций, входящих в их стандартные библиотеки, в связи с чем задача портирования кода, использующего функции стандартной библиотеки некоторого языка, на язык, в стандартную библиотеку которого эти функции не входят, представляет определенную сложность. Кроме того, функции, реализующие один и тот же алгоритм, в разных языках могут иметь разные имена и/или семантики (последнее особенно касается операторов, примером может служить оператор  $\wedge$  в Си-подобных языках (исключающее ИЛИ) и в BASIC (возведение в степень)). Поскольку в составе AST семантическая информация не сохраняется, эта задача также требует рассмотрения.

Частично эта проблема может быть решена для самых распространенных функций и операторов (математических, например) путем сохранения в AST не конкретных имен функций, а абстрактных обозначений, которые переводятся в имена функций на этапе генерации.

### «Идеология» языков

Разные языки программирования, как правило, предназначены для разных парадигм программирования. Несмотря на то, что любой реализуемый в принципе алгоритм может быть написан на любом (полном по Тьюрингу) языке программирования, реализация парадигм, поддерживаемых в исходном языке, но неподдерживаемых в целевом (в частности, таких, как множественное наследование, динамическая типизация и т. п.), может быть довольно сложной – в любом случае вопрос читаемости кода остается открытым (если не планируется использовать код только в качестве сгенерированного).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Георгиев В.О.* Учебно-модельный вариант интерактивной системы генерации ПО сложных систем, с предварительной прединтерпретацией программных модулей // Материалы 22-й Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)». – 2016. – С. 248–249.
2. *Георгиев В.О., Поликашин Д.С. и др.* Учебно-макетный вариант инструментальной системы «Преобразователь кода ТСJ» // Языки программирования и компиляторы: труды конференции / под ред. Д.В. Дуброва. – Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2017. – С. 75–78.

## **КОНЦЕПЦИИ УЧЕБНО-МАКЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА ПО СЛОЖНЫМ СИСТЕМАМ**

***В.О. Георгиев***

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

В работе представлены разработанные в ходе практических работ по учебным курсам «Проектирование и архитектура программных систем» и «Объектно-ориентированный анализ и проектирование» (методическое пособие [1]) концептуальные основы построения учебно-макетных вариантов интерактивной сборочной системы, осуществляющей в автоматическом режиме (с предварительной интерпретацией и анализом фрагментов программных кодов) сборку программных систем прикладного назначения.

Поставлены задачи систематизации результатов, полученных в ходе проведения лекционных и практических занятий по упомянутым курсам, а также задача обобщения и использования наработок, сделанных ранее, по формальным моделям и методам представления знаний предметных областей интерактивных систем. Решение данных задач позволит выйти на уровень выработки концептуальных основ построения макетных прототипов таких систем и к последующему переходу к макетным версиям генераторов ПО с целью кодовой иллюстрации основных положений учебных курсов «Программной инженерии».

Будут представлены макетные варианты системы, предназначенные для наглядной практической демонстрации содержания основных этапов и работ при разработке сложных, критических программных средств. К основным этапам будут отнесены: проектирование и управление проектом (административное, автоматическое или автоматизированное), тестирование создаваемой системы, ее документирование, оценка качества, оценка стоимости.

Сборка осуществляется в интерактивном взаимодействии с пользователем, идущем на профессиональном языке общения. Профессиональный язык общения построен на основе понятия интеллектуального интерфейса и реализуется на основе сочетания жестко запрограммированного диалога (на «верхнем» уровне перехода от одного этапа к другому) и «свободного» сценарного диалога общения (на «нижних», «внутриэтапных» уровнях).



Программная реализация сценарного диалога построена на основе макетного кодового представления основных формальных моделей интерактивных диалоговых систем человеко-машинного взаимодействия, представленных в авторском курсе «Проектирование человеко-машинного интерфейса», читаемого студентам направления «Программная инженерия» Казанского (Поволжского) Федерального Университета и базовых понятий и концепций теории схем программ. Один из примеров такой программной реализации представлен в [2].

Сборка может осуществляться в нескольких режимах:

1. Режим исходных кодов.
2. Режим исполняемых кодов.
3. Сочетание исходных и исполняемых кодов.

Генерация программных систем построена на основе использования концепций «Теории схем программ», ее базисных понятий типовых конструктивных схем и методологий программной инженерии. Программная реализация системы сделана в нескольких вариантах, в зависимости от того, какая формальная модель сценария диалога заложена. В качестве формальных моделей выделены: графовая (автоматная) модель, модель на основе функциональных сетей Петри, модель на основе семантических сетей, модель на основе реляционных данных, модель на основе теории формальных языков, вероятностная модель, модель на основе теории игр, тензорная модель и некоторые другие модели.

Опыт, полученный студентами при построении макетов таких систем, позволяет освоить также и основные базисные понятия учебного курса «Теория вычислительных процессов и систем», а также овладеть практическими программистскими навыками по созданию сложных критически важных программных разработок.

Реализация систем выполнена на основе использования основных инструментальных средств языковых сред C# и JAVA.

С детализацией также предполагается рассмотреть решение следующих проблем, возникающих при генерации ПО сложных систем:

1. Разработки и систематизации концептуальных основ технологии производства генераторов ПО сложных систем и методологий их создания.
2. Проблемы совместимости программных модулей.
3. Проблемы формализации компьютерного интерактивного взаимодействия.
4. Выбора формальных моделей человеко-машинного интерфейса (ЧМИ).

### **Систематизация концептуальных основ технологии разработки генераторов ПО сложных систем и методологий их создания**

При проектировании такого ПО, как сборочный генератор сложных систем, который сам представляет собой сложную программную систему, возникают многочисленные задачи, требующие оценки количественных и качественных закономерностей процессов функционирования системы. В общем смысле – задачи моделирования. На этапах разработки технического и рабочего проектов систем, модели отдельных подсистем детализируются, и моделирование служит эффективным инструментом для решения конкретных задач проектирования, т.е. выбора оптимального варианта (из множества допустимых) решения задачи по определенному критерию, при заданных ограничениях. При моделировании сложных систем необходимо учитывать следующие их особенности:

- сложность структуры и запутанность связей между элементами, неоднозначность алгоритмов поведения при различных условиях;
- большое количество параметров и переменных, неполнота и недетерминированность исходной информации;
- разнообразие и вероятностный характер воздействий внешней среды.

Одним из систематических, дисциплинированных, измеримых подходов в программной инженерии к разработке программных систем можно назвать макетно-модельный подход, основанный на технологических принципах, рассмотренных в работах [3, 4].

#### **Макетно-модельный подход**

Суть макетно-модельного подхода составляет использование методологии механизма теории схем программ, с выделением типовых схем функционального взаимодействия элементов ПО с полной или частичной формализацией их функционирования и программной реализацией макетных моделей элементов ПО. При практической программной реализации используется метод, суть которого в выполнении следующих пунктов:

- 1) Определение цели задачи и углубление в существо задачи.
- 2) Установление подцелей и разбиение задачи на подзадачи.
- 3) Выявление специфических особенностей разрабатываемого для решения задачи программного обеспечения.

4) Поиск эксперта, специализирующегося в области, к которой относится задача и получение его согласия на помощь в разработке системы.

5) Работа вместе с экспертом над несколькими экспериментальными примерами прикладных задач, которые должна решать разрабатываемая программная система.

6) Выбор программных средств, необходимых для создания системы. Это выбор зависит от типа решаемой задачи, финансовых возможностей и сложности программного обеспечения.

7) Выбор технологических средств, на которых будет работать программный инструментарий, приобретение инструментальных средств.

8) Построение лабораторного прототипа системы, позволяющего успешно справляться с примерами задач, решенных в п. 5.

9) Проектирование системы при участии эксперта. Выявление сущностей, взаимосвязей между ними, виды иерархий, классов.

10) Выполнение необходимого числа итераций разработки системы с испытанием в реальных практических условиях.

11) Разработка документации к системе.

С первых шагов реализации проекта необходимо стремиться к построению хотя бы ограниченной по возможностям, но правильно работающей макетной модели для улучшения взаимодействия с экспертом, для чего и используется макетно-модельный подход.

## Проблемы совместимости программных модулей

В соответствии с предлагаемым подходом необходимо в соответствии с п. 1–3 первоначально определить основные первоочередные проблемы, с которыми мы неизбежно будем сталкиваться.

Существуют множество нерешенных в настоящее время проблем, возникающих при разработке программного обеспечения сложных систем:

1) Имеет место отсутствие обратной совместимости между различными версиями программных компонентов и модулей, входящих в систему. Это может приводить к:

- нарушению целостности и единства экосистемы, выстроенной вокруг этого программного компонента, и замедлению темпов ее развития из-за разобщения сообщества программистов, использующих несовместимые версии данного программного обеспечения в своих разработках;

- замедлению реализации и развития проектов, использующих данное ПО;

- использованию в разработке системы программных компонентов, которые являются устаревшими, что, в свою очередь, влечет за собой проблемы с безопасностью и эффективностью работы системы;

- экономическим издержкам при осуществлении перехода программной системы на новую версию программного компонента.

2) В работе генератора ПО сложных систем задействованы многие программные компоненты, представленные в виде исходных кодов, в составе которых могут быть два или более компонента, имеющих в своих зависимостях один и тот же модуль, реализованный в разных несовместимых между собой версиях.

Таким образом, генератор ПО сложных систем должен включать возможность решения проблемы совместимости программных модулей, а также соответствовать некоторым требованиям, которые приведены в [5].

Формат рамок тезисов доклада не позволяет более широко осветить все задачи, возникающие при создании макетных вариантов генератора ПО. Предполагается расширить рассмотрение возникающих проблем и детализировать их решение в докладах, представленных моими коллегами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Георгиев В.О.* Методическое пособие по программе «Объектно-ориентированный анализ и программирование». Кодовое представление основных понятий ООА и П в разных языковых средах. Ч. 1. – Казань: Казан. ун-т, 2016. – 230 с.
2. *Георгиев В.О.* Учебно-модельный вариант интерактивной системы генерации ПО сложных систем, с предварительной прединтерпретацией программных модулей // Материалы XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)». – Н. Новгород, 2016. – С. 248–249.
3. *Георгиев В.О.* Программная инженерия: технологические принципы разработки программного обеспечения на уровне формализованного описания, на примере абстрагированной диалоговой системы // Материалы Международной конференции TEL'2014 «Языковая семантика: модели и технологии». – Казань, 2014. – С. 40–41.
4. *Georgiev V.O. and Prokopiev N.A.* Model Approach To Interactive System Software Development // Int. J. Appl. Eng. Res. (IJAER). – 2015. – V. 10. – No. 24. – P. 45208–45213.
5. *Поликашин Д.С., Еникеев А.И., Георгиев В.О.* Исследование проблем автоматизации решения задачи совместимости программных систем // Материалы XXII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2016)». – Н. Новгород, 2016. – С. 251.

## ПОИСК В КОЛЛЕКЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ\*

*А.М. Гусенков<sup>1</sup>, О.Н. Жибрик<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

<sup>2</sup>*ООО «Градиент технолоджи», г. Казань, Россия*

В настоящее время в Казанском федеральном университете начато формирование цифровой математической библиотеки Lobachevskii-DML [1]. Эти работы можно рассматривать как составную часть проекта создания Всемирной цифровой математической библиотеки (World Digital Mathematical Library – WDML) [2]. Назначение WDML – объединить в распределенной системе взаимосвязанных хранилищ оцифрованные версии всего корпуса математической научной литературы, включая как современные источники, так и ставшие уже историческими [3, 4]. Основные задачи построения WDML и технологии, необходимые для их решения, описаны в [5]. В работах [6–12] представлены технологии управления математическими знаниями на основе онтологий, которые полностью соответствуют идеологии проекта WDML. Результатом этих исследований стало создание системы OntoMath, которая послужила основой одного из направлений реализации проекта Lobachevskii-DML.

OntoMath – это система онтологий, инструментов текстовой аналитики и приложений для управления математическими знаниями. Центральным элементом системы является платформа семантической публикации, которая принимает на вход коллекцию математических публикаций в формате  $L^A T_E X$  и строит их семантическое представление, интегрированное в облако Linked Open Data. Семантическое представление публикаций включает: метаданные, логическую структуру публикаций (онтология Mocassin, см. [8]), математическую терминологию (онтология OntoMathPro, см. [9–11]), формулы. Семантический поисковик по математическим формулам отыскивает формулы, содержащие переменную, обозначающую заданное математическое понятие.

---

\* Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения госзадания в сфере научной деятельности, проект № 1.2368.2017/ПЧ.

Поиск по математическим документам – актуальная и быстроразвивающаяся область исследований. С одной стороны, хорошо известные системы, такие, как Google Scholar [13], Microsoft Academic Search [14], реализуют полнотекстовый поиск по ключевым словам в научных коллекциях и интернет-ресурсах. С другой стороны, ряд специализированных систем поиска по математическим формулам предлагает средства для формулирования запроса в синтаксисе языка разметки  $L^A T_E X$  (например, Springer LaTeXSearch [15], (uni)quation [16], EgoMath [17], Wolfram Formula Search [18]).

Подход, представленный в настоящей работе, направлен на интеграцию функциональных возможностей полнотекстового поиска и поиска по математическим формулам, при котором конечному пользователю предлагается формулировать поисковый запрос на поиск математической формулы в форме ключевых слов. Запрос пользователя на естественном языке переводится в термины онтологии, по которым затем формируется запрос на языке запросов к RDF-документам SPARQL [19].

В статье рассматривается способ связывания математической терминологии и формул в рамках семантического представления публикации, предложенный в работах [20–23].

В математических текстах выделяются следующие виды сущностей: математические термины, символьные условные обозначения терминов (переменные), математические фрагменты (формулы).

Определим следующие отношения: «термины – переменные» и «переменные – формулы». Первое отношение есть текстовое определение значения символа в некотором контексте с помощью терминов, второе отношение указывает на вхождение символа в формулу. Предполагается, что появление текстового определения переменной в окрестностях её символьного представления указывает на семантическую связь между ними.

Все перечисленные сущности и отношения между ними составляют контекст формулы.

### Метод разметки математических выражений

**Шаг 1.** Классификация математических выражений (МВ). В МВ выделяются: символы арифметических и логических операций, переменные, переменные с индексами, ключевые слова, числа. Если МВ содержит только одну переменную или переменную с индексом, то оно классифицируется как переменная. Иначе МВ классифицируется как формула.

**Шаг 2.** Связывание формул с переменными. Во всем анализируемом тексте для каждой переменной производится поиск вхождения этой переменной в каждую формулу. Пусть  $\{F\}$  – множество формул, а  $\{P\}$  – множество переменных.  $\forall p_i \in P$ , если  $p_i \subset f_k \in F$ , устанавливается отношение  $\langle p_i, f_k \rangle$ . Для каждого отношения в качестве атрибута запоминаются позиции формул и переменных в тексте.

В результате разметки получаем отношение много-ко-многим между формулами и переменными, входящими в состав этих формул.

### Связывание математических терминов и формул

Далее необходимо найти соответствия между формульными фрагментами публикации и расположенными в их ближайшей окрестности математическими терминами на естественном языке. Обобщенной синтаксической моделью для математического термина является именная группа.

Формульная разметка применяется к публикации, предварительно размеченной структурными аннотациями (Token, Sentence, Math и др.) и NLP-аннотациями (TERM, ENDS). Ключевыми аннотациями для связывания являются аннотации Math, размечающие формульные фрагменты, и аннотации TERM, соответствующие именным группам.

Как правило, связывание имеет смысл в рамках одного предложения или некоторой его части. Вводится понятие максимально допустимого расстояния (МДР) между аннотациями Math и TERM, которое определяется как наибольшее расстояние в символах между концом левой аннотации и началом правой, при котором может быть выполнено связывание. МДР является параметром, который оказывает непосредственное влияние на точность связывания и может различаться для разных коллекций документов.

Алгоритм связывания построен с учётом особенностей взаимного расположения формул и именных групп, а именно:

- ИГ содержит формулу, тогда ИГ – единственный кандидат для связывания;

- формула и ИГ следуют друг за другом (в пределах одного предложения), в этом случае основой анализа является концепция МДР.

Если именная группа не содержит других слов, кроме главного слова, связывание будет проведено с высокой степенью достоверности. В более сложных случаях анализируется расстояние между формулой и главным словом именной группы. Если оно оказывается больше допустимого, считается, что формула является дополнением к основному по-

нятию именной группы, и связывание не производится. Если формула не содержится внутри именной группы, аннотации-кандидаты отбираются с учётом МДР и границ предложения. Кроме того, если формула входит в группу равенств (аннотация *equationgroup*), все уравнения группы должны быть связаны с одной и той же ИГ. Из кандидатов выбирается аннотация, соответствующая типовой конструкции (например, «<формула> – <ИГ>»), а при отсутствии таковых – находящаяся на минимальном расстоянии от формулы.

Предусмотрено связывание формулы только с одной именной группой, но с одной и той же ИГ может быть связано более одной формулы. Это позволяет учитывать перечисления формул, относящихся по семантике к одной ИГ, но в то же время может давать некоторое количество недостоверных связываний. Связи, построенные на внутренней модели, переносятся в обрабатываемый документ путем дополнения существующих аннотаций новыми атрибутами.

На рис. 1 представлено поисковое веб-приложение системы *OntoMath*. Заданное наименование подставляется в поисковый запрос, результаты можно отфильтровать по разделам публикаций. Предусмотрен показ детальной информации о найденных в коллекции публикациях с возможностью перехода к просмотру самой публикации. Шаблон поискового запроса на SPARQL выглядят достаточно просто:

```
select distinct ?Concept where {[] a ?Concept} LIMIT 100
```

Можно предложить следующие возможности повышения эффективности поиска:

- улучшение существующего сервиса подсказок при наборе концептов в строке запроса на поиск;
- возможность поиска по более чем одному концепту онтологии (*union*); в этом случае подразумевается генерация SPARQL-запросов;
- генерация более сложных запросов, например: найти все публикации, в которых при доказательстве используется теорема Коши – Адамара;
- возможность дополнительной фильтрации результатов по метаданным публикаций (задание интервала для даты публикации, автора, издательства и др.);
- сортировка результатов поиска по метаданным в прямом и обратном порядках (по датам публикации, фамилии автора и др.);
- повышение корректности выделения именных групп и связывания их с формулами на основе анализа текста публикации; в настоящей реализации системы правильность связывания не превышает 70 %.



Finding Concepts in Mathematical Formulas <sup>alpha</sup>

Get instances!

Examples: [Angle](#), [Ring](#), [Graph](#), [Open set](#), [Prime number](#), [Gamma function](#), [Space](#)

Axiom (0)

Claim (0)

Conjecture (0)

Corollary (0)

Definition (0)

Equation (0)

Example (2)

Lemma (0)

Proof (0)

Proposition (0)

Remark (0)

Theorem (0)

Other (2)

Gamma function concept instances (4):

Notation	Formula	Context	
$\Gamma(\cdot)$	$\Theta_j(s) = \frac{\prod_{k=1}^{m_j} \Gamma(\beta_k^j + s) \prod_{k=1}^{n_j} \Gamma(1 - \alpha_k^j - s)}{\prod_{k=-n_j+1}^{p_j} \Gamma(\alpha_k^j + s) \prod_{k=-m_j+1}^{q_j} \Gamma(1 - \beta_k^j - s)}$	Example	<a href="#">Details...</a>
$\Gamma(\cdot)$	$\Theta_j(s) = \frac{\prod_{k=1}^{m_j} \Gamma(\beta_k^j + s) \prod_{k=1}^{n_j} \Gamma(1 - \alpha_k^j - s)}{\prod_{k=-n_j+1}^{p_j} \Gamma(\alpha_k^j + s) \prod_{k=-m_j+1}^{q_j} \Gamma(1 - \beta_k^j - s)}$	Other	<a href="#">Details...</a>

© Computational Linguistics Laboratory at Kazan Federal University, 2014–2017

⚙️
❓
🗨️

Рис. 1. Поисковая система OntoMath

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Elizarov A.M. and Lipachev E.K.* Lobachevskii-DML: Object Approach to the Creation of a Digital Mathematical Library // Proceedings of the XIX International Conference «Data Analytics and Management in Data Intensive Domains» (DAMDID/ RCDL 2017), Moscow, Russia, October 10–13, 2017 (in press).
2. *Digital Mathematics Library: a vision for the future.* International Mathematical Union, 2006 [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.mathunion.org/fileadmin/IMU/Report/dml\\_vision.pdf](http://www.mathunion.org/fileadmin/IMU/Report/dml_vision.pdf).
3. *Olver P.J.* What's happening with the World Digital Mathematics Library? [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.math.umn.edu/~olver/t\\_wdmlb.pdf](http://www.math.umn.edu/~olver/t_wdmlb.pdf).
4. *Olver P.J.* The World Digital Mathematics Library: report of a panel discussion // Proceedings of the International Congress of Mathematicians, August 13–21, 2014, Seoul, Korea. – Kyung Moon SA, 2014. – V. 1. – P. 773–785.
5. *Developing a 21st century global library for mathematics research.* – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2014. – 131 p.

6. *Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., and Nevzorova O.* Digital Ecosystem OntoMath: Mathematical Knowledge Analytics and Management // Communications in Computer and Information Science. – Springer, 2017. – V. 706. – P. 33–46.
7. *Nevzorova O., Zhiltsov N., Zaikin D., et al.* Bringing Math to LOD: a semantic publishing platform prototype for scientific collections in mathematics // 12th International Semantic Web Conference, Sydney, NSW, Australia, October 21–25, 2013, Proceedings, Part I. Lecture Notes in Computer Science. V. 8218. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 379–394.
8. *Solovyev V. and Zhiltsov N.* Logical structure analysis of scientific publications in mathematics // Proceedings of the International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics (WIMS'11). – ACM, 2011. – P. 21:1–21:9.
9. *Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A., and Lipachev E.* OntoMathPro ontology: a linked data hub for mathematics // Commun. Comp. Inform. Sci. – 2014. – V. 468. – P. 105–119.
10. *Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., et al.* Mathematical knowledge representation: semantic models and formalisms // Lobachevskii J. Mathematics. – 2014. – V. 35. – No 4. – P. 347–353.
11. *Елизаров А.М., Липачев Е.К., Невзорова О.А., Соловьев В.Д.* Методы и средства семантического структурирования электронных математических документов // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 457. – № 6. – С. 642–645.
12. *Елизаров А.М., Жиженченко А.Б., Жильцов Н.Г., и др.* Онтологии математического знания и рекомендательная система для коллекций физико-математических документов // Докл. РАН. – 2016. – Т. 467. – № 4. – С. 392–395.
13. *Google Scholar* [Электронный ресурс]. – URL: <http://scholar.google.com>
14. *Microsoft Academic Search* [Электронный ресурс]. – URL: <http://academic.research.microsoft.com>
15. *The Springer LaTeX Search* [Электронный ресурс]. – URL: <http://latexsearch.com>
16. *(Uni)quation.* Math expression search engine [Электронный ресурс]. – URL: <http://uniquation.com/en/>
17. *Misutka J. and Galambos L.* Extending Full Text Search Engine for Mathematical Content // Proceedings of DML. – 2008. – P. 55–67.
18. *The Wolfram Functions Site.* [Электронный ресурс]. – URL: <http://functions.wolfram.com/>
19. *SPARQL Query Language for RDF* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>
20. *Биряльцев Е.В., Галимов М.Р., Гусенков А.М., Жибрик О.Н.* Некоторые подходы к повышению релевантности поиска математических выражений в естественнонаучных текстах // Труды Казанской школы по компьютерной и когнитивной лингвистике TEL-2012. – Казань: Фэн Академии наук РТ, 2012. – С. 78–92.
21. *Биряльцев Е.В., Гусенков А.М., Жибрик О.Н.* Некоторые подходы к разметке естественнонаучных текстов, содержащих математические выражения // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физ.-математич. науки. – 2014. – Т. 156. – Кн. 4. – С. 133–148.
22. *Биряльцев Е.В., Гусенков А.М., Жибрик О.Н.* Поиск математических выражений в естественнонаучных текстах. Экспериментальная оценка релевантности //

---

Труды Казанской школы по компьютерной и когнитивной лингвистике TEL-2014. – Казань: Фэн Академии наук РТ, 2014. – С. 34–37.

23. Гусенков А., Биряльцев Е., Жибрик О. Интеллектуальный поиск в структурированных массивах информации // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Deutschland: OmniScriptum Marketing DEU GmbH, ISBN 978-3-659-76919-1, 2015. – 129 с.

# GPSS CLOUD – СИСТЕМА ОБЛАЧНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Т.В. Девятков*

*Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия*

Метод имитационного моделирования (ИМ), на интуитивном уровне, прост и понятен. Его можно использовать для изучения, а также улучшения функционирования практически любой сложной системы и прогнозирования ее будущего. Суть моделирования состоит в том, что вместо проведения экспериментов с самой системой строится ее программная модель и все эксперименты осуществляются с этой моделью, и только после этого результаты применяются на реальной системе. Такой подход упрощает и делает возможным экспериментирование с системой без риска нанесения ущерба самой системе.

Метод ИМ легко понять, но изучить его, научиться правильно применять, строить точные и эффективные модели довольно сложно. Некоторые специалисты, особенно после выхода классического труда Р. Шеннона [1], стали называть процесс ИМ «Искусством и наукой». И это долгие годы действительно было так. Пользователь ИМ должен обладать знаниями в самых разнообразных научных методах и программных инструментах, например [2]:

- В системном анализе. Чтобы правильно структурировать систему, корректно ввести допущения и ограничения, сформулировать цель и задачи исследования, методически верно провести эксперименты и интерпретацию результатов моделирования.

- В математической статистике. Для адекватного формирования выборок данных и проведения их всесторонней статистической обработки.

- В теории планирования экспериментов. С целью обеспечения научно-обоснованного и корректного управления ходом исследования.

- В корреляционном, регрессионном, дисперсионном и других видах математического анализа результатов экспериментов. Для определения тенденций, направлений и количественных характеристик поведения системы.

- В методах оптимизации. Чтобы обеспечить нахождение оптимальных решений, рекомендаций после анализа результатов моделирование.

• В программировании. С целью написания программ на одном из языков ИМ и дополнительных программ на общецелевых языках программирования, использования стандартных программных пакетов по статистике, оптимизации и др.

И это далеко не полный перечень научных методов и практических навыков, которыми должен был обладать пользователь ИМ. Поэтому, фактически, метод ИМ могли в полной мере и математически корректно использовать только профессионалы. Таких специалистов действительно очень мало и это очень сильно ограничивало применение ИМ в реальной экономике.

В настоящее время облачные технологии, согласно ежегодным отчетам аналитической компании «Gartner» [3], достигли уровня зрелости и поэтому достаточно проработаны и вопросы развертывания, организации и обслуживания любых облачных систем.

#### Облачные технологии в современных системах имитационного моделирования

№ п/п	Название САИИ (компания разработчик)	Наличие признаков использования облачных технологий	Модель развертывания	Модель обслуживания	Облачные сервисы
1	ARENA	-	-	-	-
2	EXTEND (Imagine That., Inc. Сан-Хосе, Калифорния, США)	+	Частная	SAAS ExtendSim ASP	-
3	AnyLogic (AnyLogic company, Санкт-Петербург, Россия)	+	-	SAAS	-
4	Simio (Simio LLC, Питсбург, США)	+	-	SAAS Simio Portal Edition с использованием Microsoft Azure	-
5	GPSS STUDIO (Элина-Компьютер, Казань, Россия)	+	Частное	PAAS	1. Сервис моделирования 2. Сервис данных
6	SIMUL8	-	-	-	-
7	AUTOMOD	-	-	-	-

Основными моделями развертывания являются частное, публичное, общественное, гибридное облако. Для обслуживания облачного моделирования наиболее подходит модель SAAS (программное обеспечение как услуга). Все это широко используется, внедрено для огромного количества задач. В некоторых организациях начаты работы и по созданию облачных систем моделирования. Имеются хорошие стартовые условия в виде высокой проработанности облачных технологий в целом. Однако нюансы, присущие процессу имитационного исследования, еще не определены. В этом направлении предстоит большая научная и практическая работа.

В таблице приведены результаты проведенного анализа применения облачных технологий при организации процесса ИИСС в наиболее популярных и используемых САИИ.

Наиболее перспективно использовать модель обслуживания SAAS, которая позволяет существенно упростить и унифицировать обмен данными и результатами в системах моделирования, образуя единую облачную среду, далее будем называть ее облачной системой моделирования. На данный момент идет работа по формированию облачной системы моделирования на основе GPSS World, в результате будет разработана система GPSS Cloud, схему работы которой можно увидеть на рис. 1.

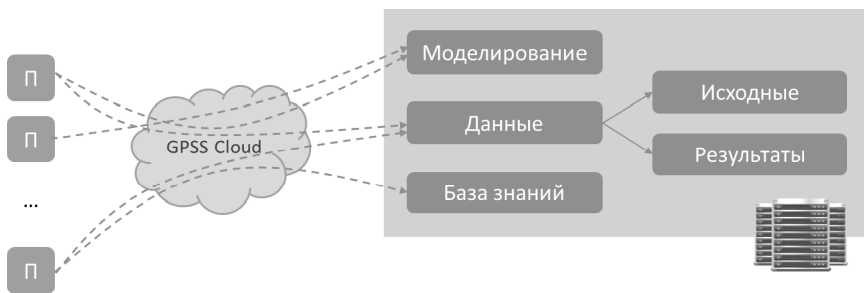


Рис. 1. Схема работы GPSS World; П – клиентское приложение

Для моделирования и проведения экспериментов над моделями исследователю в данной схеме не обязательно иметь ядро моделирования и прочие сервисы, необходимые для этой работы на собственном компьютере (модули: экспериментирования, базы знаний, данных, статистической обработки исходных данных и т.д.).

Базисом GPSS Cloud является сервис-ориентированная архитектура (SOA) организации распределенных вычислений. А технологической основой реализации данной архитектуры являются облачные вычисления. Необходимость использования облачных технологий обуславливается [1, 4, 5]:

- Сложностью вычислений на всех этапах исследования.
- Имеющейся возможностью разделения вычислений в процессе исследования.
- Совместной работой над имитационными проектами.
- Необходимостью повышения достоверности и качества всего процесса исследования.
- Потребностью сокращения сроков исследования.
- Стремлением уменьшения стоимости владения программным обеспечением за счет его аренды.

Таким образом, облачная система моделирования GPSS Cloud– это композитное приложение, размещенное в облаке и состоящее из служб, взаимодействующих между собой.

Для реализации этого проекта в течение последних лет нашей группой ведется разработка спектра сервисов, отвечающих потребностям исследователя, унификация их работы и процесса передачи данных. Основным модулем в интерфейсе пользователя системы является тонкий клиент, который позволяет работать с моделью в текстовом и визуальном режиме. В основе этого модуля находится наша разработка – Расширенный редактор GPSS World. Список уже разработанных сервисов системы:

- Сервер моделирования – необходим трансляции и компиляции модели используется ядро моделирования – GPSS World.
- Сервер моделирования – для вызова ядра моделирования, он отвечает за работу ядра моделирования на отдельном компьютере в сети, доступной клиенту (при необходимости на том же компьютере, где расположен тонкий клиент).
- Сервис хранения и унификации данных по результатам моделирования, который позволяет быстро провести анализ исследования.
- Сервис сбора динамических результатов.
- Сервис сравнения систем массового обслуживания с эталоном.

Этот список постепенно пополняется, постоянно ведутся работы по дополнению библиотеки моделей и базовых элементов графической оболочки – типовых элементарных блоков. Все эти блоки нацелены на

решения задач из разных областей и формируют из себя набор библиотек для различных практических задач.

Для того чтобы было проще создавать имитационные приложения необходимо реализовать интерфейс автоматизированного взаимодействия GPSS Cloud с приложениями из вне. Для этой цели создается собственное API (Application Programming Interface), которое позволит легко использовать облако для нужд пользователя, в web-среде или на отдельном локальном компьютере с доступом к сети интернет.

Дальнейшим шаг – разработка SDK (Software Development Kit), включающей библиотеки для быстрой разработки настольного или web-приложения и примеры использования этих библиотек, работы с внешними сервисами, такими, как Google Doc и др.

Все, что уже реализовано и будет сделано в ближайшее время, нацелено на одно – упрощение работы с системой имитационного моделирования, увеличению скорости разработки моделей. Это существенно расширит количество пользователей метода имитационного моделирования среди не специалистов и позволит быстро и недорого создавать мощные и высоконагруженные модели, которые ранее было сложно реализовать в рамках имеющихся методов и средств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
2. Девятков В.В., Девятков Т.В. Облачное моделирование – история, концепции, состояние // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14. – № 12. – С. 30–37.
3. Исследование компании Gartner [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gartner.com/technology/topics/cloud-computing.jsp>
4. Девятков В.В. Расширенный редактор GPSS World – основные возможности. – М.: ООО «Принт-сервис», 2013. – 143 с.
5. Власов С.А., Девятков Т.В., Кобелев Н.Б., Девятков В.В. Проблемы и возможности создания пакета прикладных программ имитационного моделирования для супер-ЭВМ на основе российских разработок в области имитационного моделирования // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2009–2010. Труды Международной научно-технической конференции. – М.: Центр информационных технологий в проектировании РАН. – С.77–86.



# ВЫЧИСЛЕНИЕ НОД КАК РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ В $GF(2)$

*Д.А. Долгов*

*Казанский федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, г. Казань, Россия*

Вычисление наибольшего общего делителя (НОД) используется во многих алгоритмах криптографии и компьютерной алгебры. Например, в алгоритмах факторизации натуральных чисел: в  $p-1$  алгоритме Полларда, в алгоритме Ленстры.

В рамках данной статьи предлагается новый подход вычисления НОД 2 натуральных чисел, основанный на решении системы линейных уравнений в  $GF(2)$ . В отличие от классических алгоритмов вычисления НОД данный алгоритм хорошо распараллеливается.

## Введение

Классический алгоритм Евклида используется для вычисления наибольшего общего делителя (НОД) 2 натуральных чисел  $(A, B)$ , где  $A > B > 0$ . Он основан на рекуррентной формуле

$$\text{НОД}(A, B) = \text{НОД}(B, A \bmod B),$$

которая используется для генерации пары  $(A, B)$  с уменьшающимися аргументами до тех пор, пока второй аргумент не станет равным 0.

Этот алгоритм имеет множество применений в теории чисел. Его расширенная версия используется для вычисления обратных элементов в конечных полях. Последняя операция имеет приложения в криптографии, например, для генерации ключей алгоритма шифрования RSA, для удвоения и добавления точек на эллиптические кривые и т. д.

Представлен алгебраический подход к вычислению НОД 2 натуральных чисел, основанный на вычислении НОД 2 многочленов. Предложенный алгоритм может выполняться не только последовательно, как классические алгоритмы вычисления НОД, но и параллельно.

## НОД 2 многочленов

В этой секции описан алгебраический подход к вычислению НОД 2 полиномов. Выберем произвольное поле  $K$ . Множество всех полиномов с коэффициентами в  $K$  обозначаются  $K[x]$ . Имеется 2 полинома  $f(x), g(x) \in K(x)$ :

$$f(x) = f_0 \cdot x^n + f_1 \cdot x^{n-1} + f_2 \cdot x^{n-2} + \dots + f_n = \sum_{i=0}^n f_i \cdot x^{n-i}, f_0, \dots, f_n \in K,$$

$$g(x) = g_0 \cdot x^m + g_1 \cdot x^{m-1} + g_2 \cdot x^{m-2} + \dots + g_m = \sum_{i=0}^m g_i \cdot x^{m-i}, g_0, \dots, g_m \in K.$$

Соотношение Безу – представление НОД в виде их линейной комбинации с целыми коэффициентами:

$$\text{НОД}(f, g) = d = u \cdot f + v \cdot g,$$

где  $\deg(u) = s, \deg(v) = t, d(x) = d_0 \cdot x^r + d_1 \cdot x^{r-1} + \dots + d_r$  – полином наименьшей степени, который может быть записан в этой форме.

**Теорема 1.**  $\deg(u) < \deg(g) - \deg(d), \deg(v) < \deg(f) - \deg(d)$ .

Максимально возможная степень для  $u$   $s = m - r - 1$ , а для  $v$   $t = n - n - 1$  исходя из теоремы 1. Для соотношения Безу берём с избытком  $s = m - 1, t = n - 1$ . Таким образом, в соотношении Безу получаем полиномы степени  $n + m - 1$ . Приравнявая степени, получаем систему уравнений  $A \cdot UV^T = d$ , где  $A$  – матрица Сильвестра,  $UV$  – вектор коэффициентов (рис. 1).

$$\left( \begin{array}{cccccccccccc} f_0 u_0 & 0 & \dots & & & 0 & g_0 v_0 & 0 & \dots & 0 \\ f_1 u_0 & f_0 u_1 & 0 & \dots & 0 & g_1 v_0 & g_0 v_1 & 0 & \dots & 0 \\ f_2 u_0 & f_1 u_1 & f_0 u_2 & 0 & \dots & 0 & g_2 v_0 & g_1 v_1 & g_0 v_2 & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & & & & \dots & & & \\ f_{m-1} u_0 & f_{m-2} u_1 & \dots & f_0 u_{m-1} & g_{m-1} v_0 & g_{m-2} v_1 & \dots & g_0 v_{m-1} & 0 & \dots & 0 \\ f_m u_0 & f_{m-1} u_1 & \dots & f_1 u_{m-1} & g_m v_0 & g_{m-1} v_1 & \dots & g_0 v_m & 0 & \dots & 0 \\ f_{m+1} u_0 & f_m u_1 & \dots & f_2 u_{m-1} & g_{m+1} v_0 & g_m v_1 & \dots & g_0 v_{m+1} & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & & & \dots & & & \\ 0 & \dots & 0 & f_n u_{m-1} & & & 0 & \dots & 0 & g_m v_{n-1} & \dots & \end{array} \right)$$

Рис. 1. Матрица  $A \cdot UV^T$

Размер матрицы Сильвестра  $(n+m)(n+m)$ , где  $n = \deg(f)$ ,  $m = \deg(g)$ .

**Лемма 1.** Если  $d(x) = 1$ , то  $\text{rank}(A) = \deg(f) + \deg(g)$ , где  $f \neq g$ .

**Лемма 2.** Если  $d(x) \neq 1$ , то

$$\max(\deg(f), \deg(g)) < \text{rank}(A) < \deg(f) + \deg(g), \text{ где } f \neq g.$$

**Теорема 2.**  $\deg(d) = \deg(f) + \deg(g) - \text{rank}(A)$ .

### НОД 2 натуральных чисел

Число может быть представлено как результат вычисления значения унитарного полинома при некотором  $x$ . Мы будем считать разряды числа коэффициентами этого полинома. Получится система линейных уравнений (слау). На рис. 1 представлена такая система. Матрица  $A_p$  состоит из первых  $p-1$  строк матрицы  $A$ ,  $p > 1$ .

#### Алгоритм

Вход: 2 многочлена  $f(x), g(x) \in K(x)$ .

Выход: решение системы вида  $A \cdot UV^T = \alpha \cdot d(x)$ .

1. Вычислить ранг матрицы Сильвестра.
2. Решить систему линейных уравнений  $A_p \cdot X = 0$ , где решение – вектор  $X_0$ .
3. Вернуть  $A \cdot X_0$ .

Если НОД исходных многочленов отличен от 0, то получается неполный ранг матрицы Сильвестра. Далее берем первые  $p-1$  строк матрицы Сильвестра и решаем систему  $A_p \cdot X = 0$ , где  $p = \text{rank}(A)$ . Число переменных больше числа уравнений, поэтому часть переменных выбираются произвольно. После этого число переменных равно числу уравнений, находим решение системы методом Гаусса. Алгоритм вернёт НОД, умноженный на некоторое число. Поэтому для получения точного ответа необходимо использовать в конце точные методы нахождения НОД. Например, алгоритм Евклида  $\text{НОД}(w, A \cdot X_0)$ , где  $w$  – наименьшее из исходных чисел.

Вычисление НОД над  $GF(2)$  позволит ускорить вычисление НОД. В этом случае коэффициенты полиномов – разряды двоичного представления чисел. Происходит ускорение арифметических операций вычисления ранга матрицы, нахождения решения слау, так как основная арифметическая операция – сложение по модулю 2.

### **Заключение**

Предложен новый подход к вычислению НОД 2 натуральных чисел в  $GF(2)$ . Данный алгоритм хорошо распараллеливается, так как и для вычисления ранга матрицы, и для решения слау можно предложить параллельный алгоритм решения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Van der Waerden B.L.* Einführung in die Algebraische Geometrie. – 2nd ed. – New York: Springer Verlag, 1973.
2. *Куров А.Г.* Алгебра. – М.: Наука, 1968.

# **РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ «МЕDEXPERT» ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

*А.М. Камалов, Р.А. Бурнашев*

*Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия*

Интеллектуальные экспертные системы применяются в различных областях медицины. Для создания таких проектов требуется анализ их теоретических основ для дальнейшего расширения сферы применения. В данной статье обозначены особенности медицинских экспертных систем, в качестве основного способа представления знаний в которых выступают системы правил. Авторами получены схемы, которые дают возможность расширить их использование в клинической медицине.

Экспертная система «MEDEXpert» может функционировать в трех режимах.

1. Режим ввода знаний – в этом режиме эксперт посредством редактора базы знаний вводит известные ему сведения о предметной области в базу знаний ЭС или ставит диагнозы пациентам, у которых тяжелые или редкие болезни.

2. Режим консультации – пользователь ведет диалог с ЭС, сообщая ей сведения о текущей задаче и получая рекомендации ЭС. Например, на основе сведений о физическом состоянии больного ЭС ставит диагноз в виде перечня заболеваний, наиболее вероятных при данных симптомах.

3. Режим администрирования – инженер (администратор) выполняет административные функции, редактирует информацию о пациентах, модернизирует процессы аутентификации.

Диалог между врачом и экспертной системой реализован в виде тонкого клиента. При создании интерфейса была выбрана максимально прозрачная и удобная структура (рис. 1). Проект разработан на SQL Server 2016 и предоставляет передовую, надежную и устойчивую производительность, помогает глубже проникнуть в любые данные, собранные со многих устройств, а также дает возможность использовать облако для гипермасштабирования, чтобы сделать возможными новые гибридные сценарии [1].

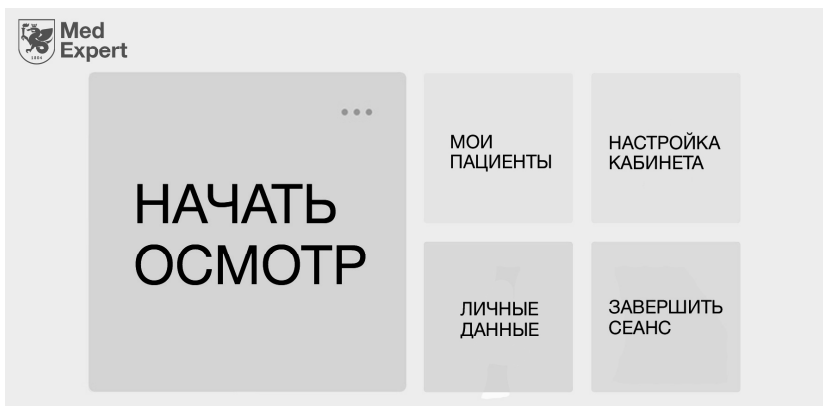


Рис. 1. Интерфейс экспертной системы «МЕDExpert»

Главная идея проекта заключается в конструировании архитектуры процесса постановки диагноза, корректной со стороны медицины и понятной для врача. К тому же данная сфера динамична, и знания должны сохранять актуальность.

### Материалы и методы

В ходе исследования были проанализированы основные проблемы отрасли проектирования экспертных систем (ЭС) в медицине, с помощью которых был получен практический результат. Была выбрана следующая последовательность действий:

1. Выявление значимых симптомов для постановки диагноза пациенту.
2. Приближенное упорядочивание полученных симптомов.
3. Для получения выборки симптомов для прототипа экспертной системы «МЕDExpert» было решено ограничиться основной частью симптомов и диагнозов, поскольку работа с общим списком симптомов и диагнозов – это задача, требующая более трудоёмкого и профессионального исследования.

Для определения основополагающих симптомов в постановке правильного диагноза в нашем проекте был использован опыт специалистов в данной области, таких, как практикующие врачи, и тематическая литература.

Visual Studio 2015 поддерживает множество дополнительных возможностей [2].

## Результаты

Полученный в результате проведенного исследования прототип «MEDEXpert» реализован с помощью набора графических инструментов.

Для каждого посетителя предусмотрен механизм аутентификации, по которому экспертная система различает пользователей.

Меню врача включает в себя такие блоки, как кнопка начала осмотра, просмотра всех пациентов и другие.

Врач составляет список симптомов, анализов. Ввод входных данных осуществляется на основании наблюдений за пациентом и его клинической картины. Как только все симптомы и анализы добавлены, врач нажимает на кнопку «Подтвердить» и автоматически переходит на страницу просмотра результатов консультации (рис. 2).

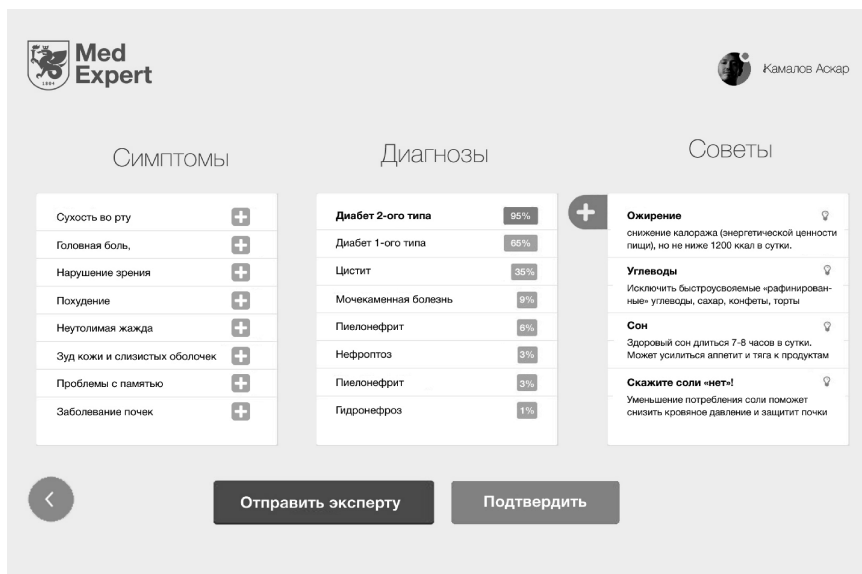


Рис. 2. Результаты консультации

Результаты консультации отображены в виде обновленных списков диагнозов и симптомов, а также информации о рассуждениях на основе физических данных пациента в виде списка правил и сделанных ими изменений.

Далее терапевт может выбрать диагноз (будет подсвечено сигнальным цветом) и подтвердить свой выбор. В случае неуверенности в своих рассуждениях или же подсказываемых ему со стороны экспертной системы данных, врач может отправить данный случай на постановку диагноза эксперту.

### **Заключение**

В ходе исследования был разработан прототип экспертной системы, предназначенный для помощи врачам в анализе собранных данных о пациенте и постановки диагноза. Для этого был проведен обзорный анализ важных аспектов в постановке диагноза пациенту и был выбран практический принцип работы прототипа. В статье описан разработанный прототип экспертной системы, в котором в качестве основного способа представления медицинских знаний выступают системы правил.

В силу своей эвристичности экспертная система является лишь системой поддержки принятия решения. Это средство эмпирического поиска, высококачественных решений на базе формализованных уникальных знаний экспертов-врачей в той или иной узкоспециальной области.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *SQL 2016* // Microsoft – официальный сайт. – 2017. [Электронный ресурс]. – URL: [https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/mt590198\(v=sql.1\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/mt590198(v=sql.1).aspx) (дата обращения 8 Мая 2017);
2. *Эндрю Троелсен. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5.* – 6-е изд.: пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. – 1312 с.: ил. – Парал. тит. англ. – С. 90.



# **ЗВУКОВОЕ ВИРТУАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ**

***К.В. Карнов, И.Д. Мухин***

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Одной из основных компонент создания виртуальной реальности является звук. Для его создания в самых популярных устройствах используется подход бинаурального эффекта. При этом чаще всего используются наушники, так как они имеют точное разделение каналов и могут изолировать слушателя от внешних шумов и реверберации в помещении. Но подход бинаурального синтеза имеет ряд недостатков при моделировании звука, заключающихся в том, что строение головы и уха каждого человека уникально и необходимо подстраивать параметры алгоритма индивидуально. Также необходимо использовать подходы для определения положения головы для воссоздания реального звукового пространства. И ко всему этому, нужно всегда оперировать совокупностью явлений для локализации, так как иначе будет теряться часть пространственных свойств. С учетом всего вышесказанного в данной статье будет предложен алгоритм для позиционирования звука в виртуальном пространстве, который будет применяться индивидуально к каждому пользователю и адаптировать звук под его характеристики.

## **Позиционируемый звук**

Позиционируемый звук, или же 3D-звук, – это технология для определения положения источников звука в пространстве. Все сигналы, которые слышит человек, имеют свои характеристики. Мозг использует их для определения информации об источнике звука. 3D-аудио пытается подражать физическим сигналам так, чтобы мозг не мог их отличить от естественных звуков.

К основным явлениям, которые помогают это сделать, относятся разность по интенсивности сигналов, разность по времени прихода сигналов, раннее отражение, реверберация и передаточная функция головы. Совокупность данных явлений позволяет полностью сохранить пространственные характеристики звука, но в данной работе рассмотрим только последнее из них.

Передаточная функция головы (Head-Related Transfer Function (HRTF)) представляет собой характеристику того, как уши воспринимают звук, который исходит из определенной точки. Формально она определяется как отношение давления, измеренного внутри слухового канала на левом и на правом ухе, к давлению, измеренному в свободном поле в точке, соответствующей центру головы. Оба уха подвергают сигналы сложным процессам фильтрации, вызванным акустическим взаимодействием с туловищем, головой и ушной раковиной. Различные складки ушной раковины изменяют частоты сигналов, усиливая некоторые частоты и ослабляя другие. Ухо действует как сложный регулятор, который зависит от направления. Эти преобразования звука из точки пространства в ушном канале могут быть точно измерены. Таким образом, можно составить набор фильтров, которые могут быть использованы для указания направления звука. Функция этих фильтров и называется HRTF. Если выбрать подходящую пару фильтров для ушей и применить её к моделируемому звуку, то можно изменить направление восприятия звука. Использование данной функции позволит полностью решить проблему позиционирования звука в виртуальном пространстве. Схематично принцип работы HRTF изображен на рис. 1.

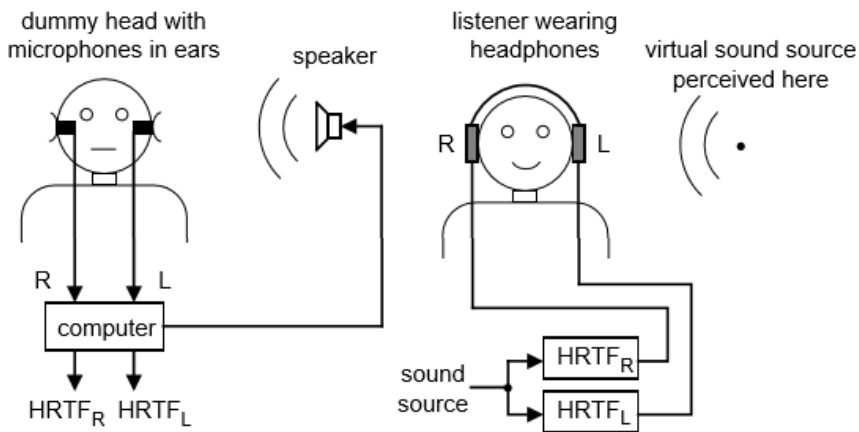


Рис. 1. Принцип работы HRTF

### **Передаточная функция головы**

HRTF лежит в основе многих алгоритмов, которые применяются в современном оборудовании для создания виртуальной реальности. Но при этом они часто не учитывают некоторые особенности этих функций. Например, некоторые не используют индивидуальные характеристики пользователей. Это приводит к тому, что теряется эффект позиционируемого звука, так как применяемые фильтры имеют не те пространственные характеристики.

Мозг каждого человека приспособлен к распознаванию и обработке только своих уникальных фильтров. Поэтому создание передаточных функций является сложным процессом, так как не существует людей с одинаковым строением головы и ушей. Из этого следует, что невозможно использовать универсальную HRTF, которая хорошо бы работала для всех пользователей.

Эту проблему можно решить, создавая некоторые базы измерений разных людей, в которых будут известны характеристики их строения головы и ушей. После на основе этих данных можно проводить подбор различных фильтров, которые бы подходили конкретному слушателю [1, 2]. Проблема здесь заключается в том, как получить характеристики головы и ушей текущего пользователя.

### **Базы с измерениями**

В данной работе будем рассматривать две базы с измерениями: KEMAR HRTF Data и CIPIC HRTF database. Данные из этих баз предоставляются с разрешением воспроизводить и использовать их для любых образовательных, исследовательских и коммерческих целей.

KEMAR – это акроним от Knowles Electronic Mannequin for Acoustic Research. Представляет собой антропоморфный манекен, который состоит из туловища и головы, размеры которых соответствуют усредненным размерам человека [5]. Измерения проводились в безэховой камере MIT. KEMAR был установлен вертикально на моторизованном вращающемся столе, который можно точно устанавливать до любого азимута. Динамик был закреплен так, чтобы обеспечивать точное позиционирование на любом возвышении относительно KEMAR. Измерения проводились на одной высоте за раз с вращением микрофона по азимуту. На азимуте в 0 градусов динамик располагался перед KEMAR

на расстоянии 1,4 м. Считается, что источник звука всегда находился в пределах 1,5 см от желаемого положения, что соответствует угловой ошибке в  $0,5^\circ$ . Сферическое пространство вокруг KEMAR выбиралось на отметках от  $40^\circ$  ниже горизонтальной плоскости до  $90^\circ$  непосредственно над головой с шагом  $10^\circ$ . На каждом уровне высоты отбирали полный 360-градусный азимут с равными размерами. Размеры приращения азимута были выбраны так, чтобы поддерживать приращения порядка  $5^\circ$ . Всего было выполнено 710 замеров.

CIPIC является акронимом Center for Image Processing and Integrated Computing. В базе данных содержатся HRTF измерения 45 разных людей с их параметрами головы и торса [4]. Используемые измерения схематично изображены на рис. 2. Также в ней содержатся данные с KEMAR с большими и маленькими ушными раковинами. Суммарно база включает в себя 2500 измерений. Эти измерения были записаны в одинаковых позициях. Было использовано 25 положений по азимуту и 50 положений по вертикали. Благодаря антропоморфным параметрам в базе, можно подбирать те значения фильтров HRTF, которые наиболее подходят слушателю.

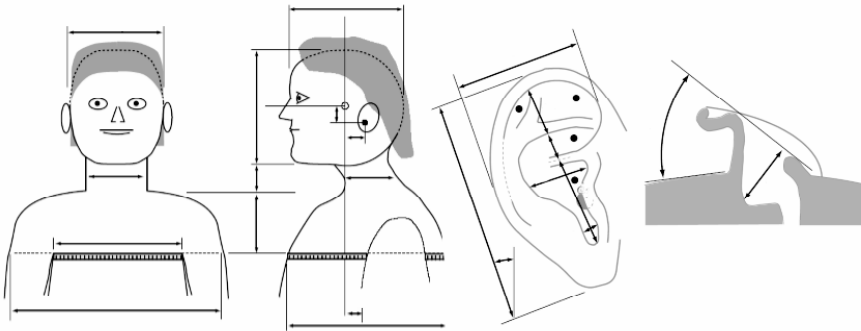


Рис. 2. Параметры головы и торса

Для данных баз существуют документации по использованию и наборы примеров для MATLAB. В примерах содержатся скрипты для доступа к фильтрам, для отображения имеющихся измерений, для наложения фильтров на звук и т.д.

### Позиционирование головы

При использовании шлема виртуальной реальности положение головы определяется при помощи гироскопа и акселерометра. Эти данные могут быть использованы для выбора фильтров передаточной функции головы, но также необходимы данные о форме головы и ушей пользователя. Для этого нужно использовать дополнительные датчики. Рассмотрим сенсор Kinect и использование камеры вместе с библиотекой OpenCV [3].

Kinect – это бесконтактный сенсорный игровой контроллер, разработанный компанией Microsoft. Он позволяет распознавать движения тела, мимику лица и голоса. Но из необходимых функций можно выделить определение возраста человека, его веса, длины окружности головы, роста и ширины плеч. Эти данные помогут выбрать необходимые пары HRTF из CIPIC HRTF database. Таким образом, будет возможно персонализировать передаточные функции.

Необходимые параметры также можно получить, используя камеру и библиотеку OpenCV. Это библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображения и численных методов общего назначения. Существуют разные обученные реализации для распознавания головы и лица человека.

### Алгоритм позиционирования звука

Для того чтобы получить позиционируемый звук, необходимо в качестве исходного сигнала использовать монофоническую запись. Это объясняется тем, что для каждого уха будут смоделированы разные звуки на базе исходного.

Для формирования звука для ушей нужно использовать индивидуальные HRTF-функции. Их можно получить, используя существующие базы с измерениями. Для этого нужно с помощью сторонних датчиков обработать параметры торса и головы пользователя и, используя эти данные, подобрать необходимые функции.

После выбора передаточной функции нужно определить положение головы в пространстве. Используя эти данные, можно выбрать необходимые пары фильтров.

Применяя фильтры к монофонической записи, создаются звуки для правого и левого уха. Как показано в примерах, которые поставляются с базами данных, применять фильтры возможно в реальном времени. Далее с помощью наушников данные звуки воспроизводятся пользователю.

### Заключение

В результате данной работы был предложен алгоритм для позиционирования звука в виртуальном пространстве. Полученный алгоритм использует подход бинаурального синтеза и использует наушники для вывода звука пользователю. Для моделирования звука используются индивидуальные передаточные функции головы, которые учитывают параметры торса и головы слушателя. Также используется определение положения головы в пространстве для выбора необходимых фильтров, которые могут применяться в реальном времени. На данном этапе требуется прототипирование данного алгоритма и выявление его недостатков. В дальнейшем он составит основу для создания виртуального звукового пространства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Dmitry N. Zotkin, Jane Hwang, Ramani Duraiswami, and Larry S. Davis.* HRTF personalization using anthropometric measurements. – Perceptual Interfaces and Reality Laboratory, Institute for Advanced Computer Studies (UMIACS). – 4 p.
2. *Russell Martinm and Ken McAnally.* Interpolation of Head-Related Transfer Functions. – 2007. – 26 p.
3. *Myung-Suk Song, Cha Zhang, Dinei Florencio, and Hong-Goo Kang.* Personal 3D audio system with loudspeakers. – Department of Electrical and Electronic, Yonsei University, Microsoft Research, 2010. – 6 p.
4. *Algazi V.R., Duda R.O., Thompson D.M., and Avendano C.* The CIPIC HRTF Database. – Center for Image Processing and Integrated Computing, Creative Advanced Technology Center, 2001. – 4 p.
5. *William G. Gardner.* 3-D Audio Using Loudspeaker. – Massachusetts Institute of Technology, 1997. – 153 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СМО, ОСНОВАННОЙ НА КВАНТОВАНИИ\*

*Ю.Я. Кацман<sup>1</sup>, С.В. Полянский<sup>1</sup>, Ю.Б. Буркатовская<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Разработка и исследование моделей СМО, ввиду многообразия задач и сложности объектов моделирования, актуальна и сегодня. Планируемые на выполнение процессы могут иметь различные приоритеты, либо быть беспriorитетными [1, 2]. В операционных системах (ОС) процессы обслуживаются по приоритетам, либо в режиме квантования, обычно реализуют оба подхода. В работах [3, 4] исследованы СМО со смешанными приоритетами, в работах [5–9] рассмотрены модели систем с планированием процессов в режиме квантования. В работах [10, 11] методом асимптотического анализа получены стационарные распределения общей емкости клиентов, исследованы двумерные стохастические процессы для двух типов клиентов, оценены параметры распределений.

### **Постановка задачи**

В представленной работе решались следующие основные задачи:

- построение многозадачной модели СМО с беспriorитетной циклической дисциплиной обслуживания RR (Round Robin);
- анализ характеристик модели и их сравнение с однозадачной;
- исследование зависимостей характеристик системы от выбора периода квантования.

Суть алгоритма RR – параллельное выполнение нескольких процессов. Смена процесса происходит при одном из условий [1, 2]:

- процесс полностью завершился;
- исчерпан квант серверного времени, отведенный данному процессу.

---

\* Статья подготовлена в результате исследований, проведенных в Томском политехническом университете, в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Недостатки однозадачной FCFS-системы очевидны при поступлении на обслуживание «длинной» заявки:

- во-первых, для «коротких» заявок время ожидания в очереди существенно увеличивается;
- во-вторых, количество обработанных в единицу времени заявок сильно флуктуирует.

Поэтому алгоритм RR является более «справедливым», так как в этом случае короткие заявки обслуживаются параллельно с длинными.

### Разработка модели

Концептуальная схема СМО представлена на рис. 1. Входящий поток состоит из двух блоков, генерирующих заявки с различным временем обслуживания. Сгенерированные заявки поступают в бесприоритетную очередь бесконечной длины.

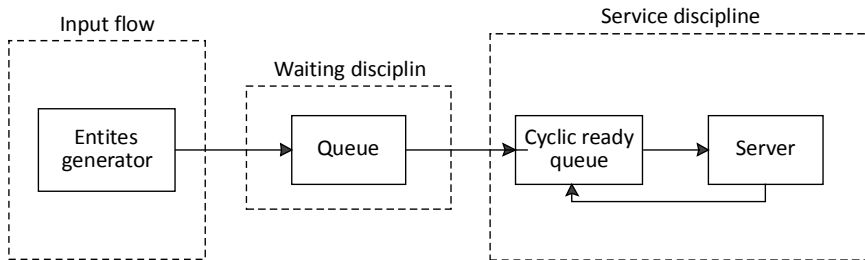


Рис. 1. Схема системы с циклической дисциплиной обслуживания (RR)

В модели реализована дисциплина обслуживания FCFS. Освободившийся сервер пытается выполнить очередную заявку из циклической очереди, в СМО параллельно выполняются пять заявок. Если в циклической очереди отсутствует заявка, то она подгружается из общей очереди. Таким образом, короткая заявка, поступившая в систему позже длинной, может быть обслужена раньше.

Структура однозадачной модели СМО аналогична, только в этом случае количество параллельно выполняемых процессов равно 1.

Разработка и тестирование модели [12] проведены в среде Matlab + Simulink. Система работает в режиме разделения ресурсов одного сер-



вера между несколькими процессами. На общей схеме (рис. 2) присутствуют блоки подсистем «Task Generator», «Queue», «Service Discipline», «Gathering Statistic Subsystem», «Display Statistics Subsystem», блок «Enabled Gate» и блок «Entity Sink», завершающий время жизни процесса в системе [13].

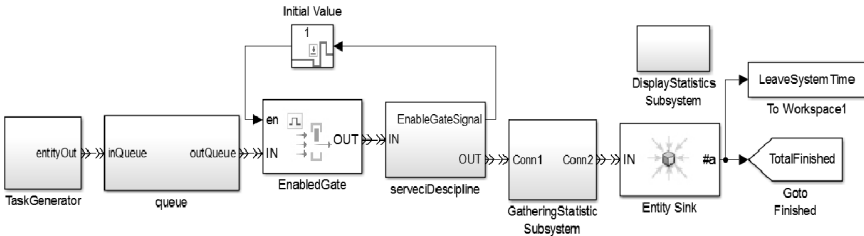


Рис. 2. Модель СМО с дисциплиной обслуживания, основанной на квантовании

Рассмотрим кратко назначение каждого блока. Блок «Enable Gate» пропускает один новый процесс в циклическую очередь, расположенную в «Service Discipline». Поступления новой заявки происходит, если свободно место в циклической очереди и общая очередь не пуста. «Queue» содержит бесконечную очередь, система без потерь. В «Gathering Statistics Subsystem» собирается статистика, анализируемая в дальнейшем. «Display Statistics Subsystem» накапливает характеристики модели. Характеристики системы передаются блоками «Goto», а принимаются – «From». «Service Discipline» содержит прибор, очередь обслуживаемых заявок и блоки статистики.

### Планирование экспериментов

СМО во всех опытах система была перегружена, время моделирования составляло 5000 ед. В систему по экспоненциальному закону поступали заявки двух типов, обслуживающиеся по равномерному закону: «длинные» А –  $\Delta t = [80 : 90]$ ; «короткие» В –  $\Delta t = [4 : 6]$ . В табл. 1 приведены характеристики экспериментов с СМО.

Эксперименты проводились для однозадачной (FCFS) и многозадачной (RR) систем. Влияния времени квантования на характеристики системы исследовалось для интервалов равных 1, 2, 3, 4, 5 и 6 ед. времени.

Таблица 1

## Характеристики проведенных экспериментов

№	$\bar{t}_A$	$\bar{t}_B$	$N_A$	$N_B$	$N = N_A + N_B$	$N_A/N \times 100\%$
1	130	10	40	496	536	7,5
...						
5	70	25	74	206	280	26,4
...						
10	17	95	295	52	347	85,0

Обозначения:  $\bar{t}_A$ ,  $\bar{t}_B$  – средний интервал времени поступления длинных и коротких заявок в систему;  $N_A$ ,  $N_B$  – количество длинных и коротких заявок, поступивших в систему.

## Анализ результатов

Результаты обработки заявок для модели FCFS приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Количество обработанных заявок для однозадачной СМО

№	Finished(A)	Finished(B)	TotalFinished	$K = \text{TotalFinished}/N$
1	34	420	454	0,85
...				
5	50	145	195	0,70
...				
10	58	10	68	0,20

В системе RR опыты проводились для разных квантов времени (табл. 3).

Таблица 3

## Количество обработанных заявок для многозадачной СМО

№	Finished(A)						Finished(B)					
	Интервал квантования						Интервал квантования					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	32	32	32	32	32	32	433	430	431	428	429	432
...												
5	49	48	48	48	48	48	148	148	148	148	148	147
...												
10	57	56	56	56	56	56	11	11	11	11	11	11

Обозначения: Finished(A) и Finished(B) – количество длинных и коротких заявок.

Сравнение двух дисциплин обслуживания (табл. 2 и 3) показывает:

- в RR-системе количество обработанных заявок больше, чем в однозадачной за счет коротких заявок, этот эффект наблюдается в СМО, где доля длинных заявок меньше 15 %;
- при доле длинных заявок более 15 % общее количество обработанных заявок в двух моделях совпадает;
- количество обработанных заявок практически не зависит от продолжительности кванта времени (см. табл. 3).

Сравнение временных характеристик двух систем приведено в табл. 4.

Таблица 4

### Временные характеристики систем

№	Система RR ( $t_q = 1$ )				Система FCFS			
	AverageSystem Time		AverageService Time		AverageSystem Time		AverageService Time	
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
1	624,8	206,5	490,1	25,21	399,9	343,4	85,3	4,994
	...							
5	910,1	494,5	526,5	26,31	752,5	716,8	85,15	4,979
	...							
10	2169	1555	567,7	23,77	2049	1566	85,23	4,873

Обозначения: AverageSystemTime – среднее время нахождения заявки в системе; AverageServiceTime – среднее время нахождения заявки на обслуживании.

Для алгоритма RR увеличивается время нахождения длинных заявок в системе, однако из-за параллельного выполнения нескольких заявок уменьшается среднее время нахождения в системе коротких заявок. В системе RR Average wait значительно меньше, чем в однозадачной.

Проанализируем влияние интервала квантования (табл. 5).

Таблица 5

### Зависимость времени обслуживания заявки от интервалов квантования

№	AverageServTime (A)					AverageServTime (B)				
	Квант времени					Квант времени				
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
1	527,1	522	463,4	473,7	506,9	26,45	21	23,72	16,75	4,993
	...									
5	557,8	552	525,8	528,1	535,5	27,35	21,72	25,93	17,3	4,977
	...									
10	581	575,3	568,7	563,7	559,1	26,01	20,45	25,1	16,91	4,885

Влияние интервала квантования на заявки А и В различно:

- с увеличением кванта времени время выполнения длинных заявок уменьшается на  $\sim 5\%$ ; этот вывод справедлив для всех экспериментов;
- для фиксированного интервала квантования среднее время обработки длинных заявок увеличивается (на  $\sim 10\%$ ) при увеличении доли длинных заявок во входящем потоке;
- для коротких заявок среднее время обслуживания практически не зависит от номера эксперимента, но с увеличением интервала квантования уменьшается за счет уменьшения количества циклов;
- при  $t_q = 6$  заявка А обрабатывается за один цикл (однозадачная система); однако в отличие от FCFS в системе RR короткая заявка, поступив в систему позже, может обслужиться раньше.

Анализ выходящих потоков проводился в системе Statistica 10 [14, 15]. На рис. 3, *a, b* приведены результаты для однозадачной системы с различными интенсивностями входных потоков длинных и коротких заявок (номер переменной дисциплины обслуживания соответствует № теста табл. 1). Результаты для циклической дисциплины обслуживания представлены на рис. 3, *c, d*. Здесь  $t_q$  – интервал квантования.

На всех графиках гистограмма – экспериментальные данные, сплошная линия – экспоненциальная функция, параметр которой  $\lambda$  определен по опытным данным. Обсудим полученные результаты:

- для однозадачной СМО поток имеет дискретно-непрерывное распределение;
- при RR дисциплине выходящий поток – непрерывный; «хвост» распределения утяжеляется с ростом доли длинных заявок;
- интенсивность потока обслуженных заявок в системе RR практически не зависит от величины кванта времени.

Проверим гипотезу – выходящий поток имеет экспоненциальное распределение. Результаты проверки критериев Пирсона и Колмогорова – Смирнова [14] показали, при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  нулевую гипотезу следует отвергнуть – поток имеет неэкспоненциальное распределение.

### Заключение

Разработаны модели СМО, реализующие законы управления FCFS и RR. Входной поток состоял из заявок двух типов: длинных и коротких. При моделировании система была перегружена. Исследовано влияние интервала квантования (от 1 до 6 ед.) на характеристики системы и выходящий поток заявок.

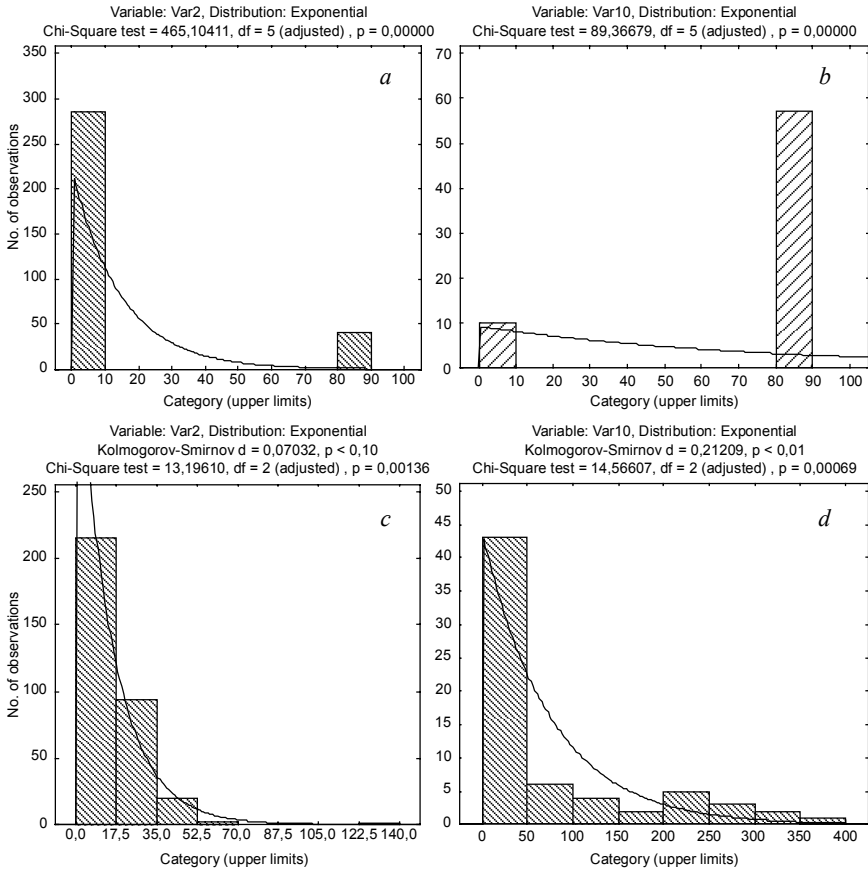


Рис. 3. Плотность распределения потока обслуженных заявок:

*a* – FCFS – эксперимент № 2; *b* – FCFS – № 10;

*c* – RR –  $t_q = 1$ , № 2; *d* – RR –  $t_q = 1$ , № 10

Анализ результатов показал, что в RR-системе среднее время ожидания обслуживания меньше, чем в FCFS. Среднее время обслуживания коротких заявок в системе RR меньше, чем в однозадачной. Правда, длинные заявки при этом обслуживаются дольше. Выбор величины интервала квантования существенно влияет на характеристики СМО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Krzyzanowski P.* Process Scheduling, Information on <http://www.cs.rutgers.edu/~pxk/416/notes/07-scheduling.html>. – 2015.
2. *Jaiswal N.K.* Priority queues. – New York and London: Academic Press, 1968.
3. *Apachidi X.N. and Katsman Yu.Ya.* Development of a queuing system with dynamic priorities // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 685. – P. 934–938.
4. *Stephen S. Fratini.* Analysis of a dynamic priority queue // *Communications in Statistics. Stochastic Models*. – 1990. – V. 6(3). – P. 415–444.
5. *Shahram Saeidi, H. Alemi Baktash.* Determining the Optimum Time Quantum Value in Round Robin Process Scheduling Method // *I.J. I.T. and Computer Science*. – 2012. – V. 10. – P. 67–73.
6. *Raspopov A., Katsman Y.* Resource Allocation Algorithm Modeling in Queuing System Based on Quantization // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 685. – P. 886–891.
7. *Siva Nageswara Rao G., Srinivasu N., and Rama Koteswara Rao G.* Dynamic time slice calculation for round robin process scheduling using NOC // *Int. J. Electrical and Computer Engineering*. – 2015. – V. 5(6). – P. 1480–1485.
8. *Siva Nageswara Rao G.* Real time scheduling for dynamic process execution using round robin switching // *J. Theoretical and Applied Inform. Techno.* – 2016. – V. 89(1). – P. 60–66.
9. *Upadhyay A. and Hasija H.* Optimization in round robin process scheduling algorithm // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2016. – V. 434. – P. 457–467.
10. *Lisovskaya E., Moiseeva S., and Pagano M.* The Total Capacity of Customers in the Infinite-Server Queue with MMPP Arrivals // *Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds.) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2016. Communications in Computer and Information Science. V. 678.* – Springer, Cham, 2016. – P. 110–120.
11. *Pankratova E. and Moiseeva S.* Queuing system with renewal arrival process and two types of customers // *2015 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 2015-January (January), 7002154.* – 2015. – P. 514–517.
12. *Sargent R.G.* Verification and validation of simulation models // *Proc. of the Winter Simulation Conf. Miami (USA).* – 2008. – P. 39–47
13. *SimEvents.* Model and simulate discrete-event system. – URL: <http://www.mathworks.com/products/simevents/>
14. *Халафян А.А.* STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: ООО «Бинном-Пресс», 2007.
15. *J. Sá.* Applied statistics using SPSS, STATISTICA, Matlab and R. – Berlin: Springer, 2007.
16. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ВЫПУСКНИКОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ 18.03.02**

***К.В. Кошкина, Л.Ю. Кошкина, А.А. Хальфина***

*Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань, Россия*

Образовательный процесс в высшей школе – сложная система, нуждающаяся в управлении и координации взаимосвязанных подпроцессов, эффективность функционирования которой отражается в степени востребованности рынком труда выпускников с их компетенциями. Рейтинг вуза, выделение государством бюджетных мест высшим учебным заведениям непосредственно зависят от количества трудоустроенных выпускников [1].

Цели проектирования базы данных выпускников ФГБОУ ВО «КНИТУ» по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», профиль подготовки «Рациональное использование материальных и энергетических ресурсов» – это организация структурированного и долговременного хранения данных о студентах, нуждающихся в трудоустройстве либо уже трудоустроенных; сокращение времени обработки оперативных данных; повышение степени достоверности обработки информации; повышение оперативности получения выходных данных с дальнейшим формированием стратегии профессиональной подготовки; улучшение качества обработки информации [2].

Анализ электронных бюллетеней «Программы для ЭВМ, базы данных» показал, что в Российской Федерации в настоящее время активно ведутся разработки в области проектирования баз данных. Тем не менее разработок, напрямую относящихся к обобщенной теме работы: «Проектирование базы данных выпускников по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», не найдено.

Этапы проектирования, создания базы данных определяются следующей последовательностью.

Подготовительный этап состоит из следующих подразделов: определение сферы применения базы данных; сбор информации об использо-

вании данных, осуществляемый обычно с помощью анкетирования, опроса, собеседования с конечными пользователями будущей базы данных; преобразование собранной информации в форму, удобную для проведения анализа информации и дальнейшего ее использования.

На следующем этапе выполняется проектирование базы данных на логическом уровне, т.е. создаётся первоначальный проект базы данных в виде СУБД-независимого концептуального представления. На данном этапе описываются локальные представления пользователей, выделяются сущности и их атрибуты, устанавливаются связи между ними, определяются наборы возможных запросов к данным для каждого пользователя. Графически оформляется в виде диаграммы или в виде таблиц и матриц связей.

Далее следует проектирование СУБД-ориентированной реализации концептуальной схемы базы данных для выбранной модели данных. Проектирование базы данных на этом этапе состоит из проектирования данных и программ их обработки.

Заключительный этап – физическое проектирование. Задачу физической реализации данных и выбора методов доступа к ним решает обычно операционная система, под управлением которой работает система управления базами данных [3].

Описание предметной области.

В связи с увеличивающимся объёмом информации в ФГБОУ ВО «КНИТУ» и повсеместной компьютеризацией, а также с целью ресурсосбережения возникла объективная необходимость автоматизировать систему регистрации и учета трудоустройства выпускников вуза, в частности бакалавров по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» по профилю подготовки «Рациональное использование материальных и энергетических ресурсов».

Требуется спроектировать базу данных, включающую информацию о выпускниках ФГБОУ ВО «КНИТУ» по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и их трудоустройстве. Пользователи базы данных могут получить сведения по трудоустройству выпускников, их контакты, список публикаций, наград, узнать о достижениях студентов за годы обучения в вузе, узнать о мероприятиях, в которых они приняли участие, узнать информацию о месте трудоустройства, к какой отрасли относится организация, самостоятельность трудоустройства или место



работы предложено вузом (см. рис. 1), тему и направления выпускных квалификационных работ, их научных руководителей, успеваемость для дальнейшего анализа данных. Следует также, отметить, что трудоустраиваться студенты могут и совмещая учёбу в вузе, а также работать во время и по завершении обучения в ФГБОУ ВО «КНИТУ».



Рис. 1. Схема взаимодействия выпускников и участников процесса содействия трудоустройства

Сущности и их атрибуты.

Приведём сущности с указанием возможных первичных ключей:

ВЫПУСКНИКИ (ФИО студента, ...);

ДИПЛОМ (Код диплома, ...);

ОРГАНИЗАЦИИ (Код организации, ...);

СОТРУДНИКИ (ФИО сотрудника, ...);

ГРУППЫ (Номер группы, ...);

ПУБЛИКАЦИИ (Наименование публикации, ...);

НАГРАДЫ (Код награды, ...).

После проведения нормализации отношений приведем предварительные отношения с неключевыми атрибутами.

- R1: Выпускники (id\_выпускника, фамилия, имя, отчество, пол, дата рождения);
- R2: Доп\_свед (id\_выпускника, телефон, e-mail, семейное положение);
- R3: Дипломы (id\_диплома, наименование, id\_выпускника, id\_руководителя, оценка, кафедра, средний балл);
- R4: Образование (id\_диплома, дата начала, дата завершения, квалификация, id\_организации);
- R5: Организации (id\_организации, наименование, страна, адрес, контакты, e-mail, web\_site);
- R6: Трудоустройство (id\_организации, id\_выпускника, отдел, должность, функции, телефон);
- R7: Сотрудники (id\_сотрудника, ФИО, должность, звание, ученая степень, телефон, e-mail сотрудника);
- R8: Группы (номер\_группы, код направления, наименование, профиль, год поступления);
- R9: Публикации (наименование публикации, id\_выпускника, источник, соавторы);
- R10: Награды (id\_награды, наименование, дата награждения, мероприятие, id\_выпускника).

Существуют два основных подхода к проектированию реляционных баз данных: формализованный, основанный на знании теории реляционных структур данных, к нему относятся методы синтеза и декомпозиции и неформализованный – метод ER-диаграмм [4].

В ER-методах проектирования баз данных используются понятия «сущность» («entity») и «связь» («relationship»). Во время проектирования баз данных происходит преобразование ER-модели в конкретную схему базы данных на основе выбранной модели данных (например, реляционной). Достоинство реляционной модели данных заключается в понятности и удобстве физической реализации на компьютере. Метод не требует знания основ теории реляционных структур данных, простота алгоритма позволяет использовать метод в программных средствах автоматизации проектирования, таких как Erwin, Rational Rose и др. [5].



ных, как ERwin (Logic Works), S-Designor (SPD), DataBase Designer (ORACLE), которые обеспечивают моделирование данных и разработку схем баз данных для основных СУБД.

Спроектированная база данных выпускников направлена на взаимодействие работодателей, выпускников и сотрудников образовательной организации, отвечающих за содействие трудоустройству, на повышение эффективности деятельности вуза, качества подготовки специалистов в области ресурсосбережения, повышение оперативности управления, планирования и использования ресурсов вуза. Внедрение данного программного продукта позволит уменьшить затраты времени администрации кафедры, специалистов по трудоустройству, при подготовке отчетов, поможет обеспечить обратную связь выпускник-вуз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Коновалов Д.П.* Автоматизация учёта трудоустройства выпускников вуза // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – № 3-1. – С. 85–93.
2. *Берко В.А., Таран В.Н.* Информационная система – трудоустройство выпускников вузов Республики Крым // Перспективы науки-2016. – 2016. – С. 130–134.
3. *Преснякова Г.В.* Проектирование интегрированных реляционных баз данных. – М.: КДУ; Санкт-Петербург: Петроглиф, 2007. – 223 с.
4. *Кошкина Л.Ю., Сафонова Т.В., Понкратов А.С.* Повышение эффективности научно-исследовательской деятельности студентов в решении задач энергоресурсосбережения // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 23. – С. 485–489.
5. *Кошкина Л.Ю., Емельянов В.М., Кошкина К.В.* Проектирование реляционной базы данных для мероприятий повышения квалификации в области энергоресурсосберегающих технологий // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 20. – С. 353–357.

## **РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

***М.Ю. Перухин***

*Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань, Россия*

В настоящее время на предприятиях используются современные средства автоматизации. На кафедре АССОИ, ФГБОУ ВО «КНИТУ», создана учебная лаборатория, предназначенная для проведения практических занятий со студентами общих специальностей университета по курсу «Системы управления химико-технологическими процессами». Основной целью изучения дисциплины является получение практических навыков по использованию средств автоматизации на основе модельного ряда приборов фирмы ОВЕН [1–3].

Программируемые логические контроллеры являются неотъемлемой частью систем автоматизации. На рынке имеется большой ассортимент ПЛК различных производителей, отличающихся друг от друга по ряду признаков [4–6].

Процессорный модуль включает в себя микропроцессор, запоминающие устройства, часы реального времени и сторожевой таймер [7].

ПЛК используются во всех производственных процессах. Например, для автоматизации технологических процессов, в системах противоаварийной защиты и сигнализации, для сбора и архивирования данных.

Одним из крупнейших российских производителей ПЛК является ПО «ОВЕН».

Одна из работ позволяет изучать периодические процессы. В качестве управляющего устройства используется ПЛК-73.

ПЛК-73 позволяет управлять технологическим процессом непосредственно с лицевой панели контроллера [5].

Использование виртуального стенда в учебном процессе позволяет предоставить возможность студенту провести эксперименты с оборудованием и материалом, которых нет в реальной лаборатории, получить практические навыки проведения работы, познакомиться детально с компьютерной моделью и процессом работы аппаратуры.

Таким образом, виртуальный стенд возможно использовать для:

- подготовки обучающихся к реальному процессу;
- самообразования;
- удаленного обучения;
- занятий, если в наличии нет нужных материалов и оборудования.

Визуализация – один из наиболее наглядных приемов обучения, которые помогают проще и глубже разобраться в сущности процесса [8].

Необходимость создания виртуального стенда в образовании возникла в связи с трудностями создания реального стенда. Если сравнивать виртуальные и реальные стенды, можно выделить следующие преимущества виртуальных стендов:

- для проведения разного рода лабораторных работ не нужно приобретать дорогое оборудование;
- возможность создания большего набора периодических процессов, протекание которых тяжело в реальных условиях;
- безопасность;
- возможность изменения времени периодических процессов;
- визуализация процесса;
- благодаря тому, что при моделировании виртуального процесса управление идет через компьютер, появляется возможность проведения множества опытов с разными значениями входных параметров [8].

При создании виртуального стенда симуляции периодического процесса для лаборатории кафедры «Автоматизированные системы сбора и обработки информации» КНИТУ был выбран контроллер ПЛК 73.

Для ознакомления студентов управлением периодическим процессом при помощи контроллера, создан виртуальный стенд, который является дополнением стенда созданного на базе ПЛК-73. Программа управления процессом написана в оболочке CoDeSys на языке программирования CFC (рис. 1).

Составление программы начинается через вкладку POU. К программным компонентам POU (Program Organization Unit) относятся функциональные блоки, функции и программы. Отдельные POU могут включать действия (подпрограммы). Каждый программный компонент состоит из раздела объявлений и кода. Для написания всего кода POU используется только один из МЭК языков программирования (IL, ST, FBD, SFC, LD или CFC). Входные переменные POU объявляются между ключевыми словами VAR\_INPUT и END\_VAR. Значения этих переменных передаются в POU, при его вызове.

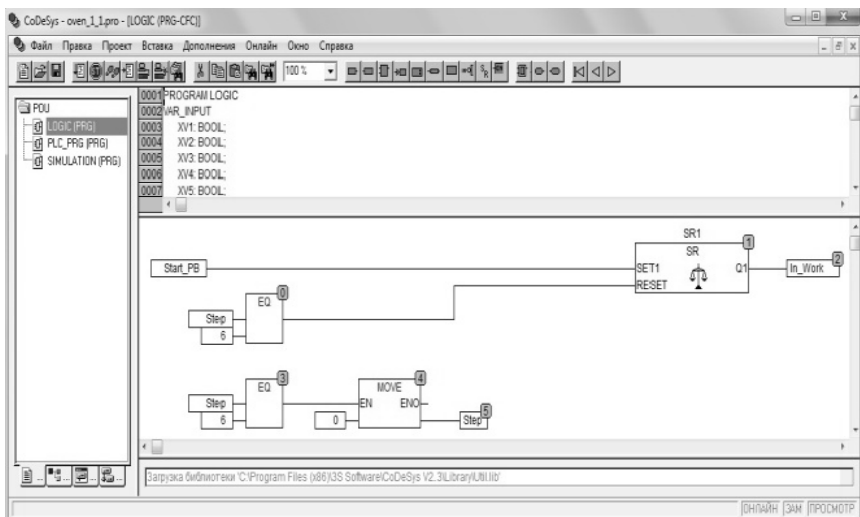


Рис. 1. Программирование в CoDeSys

Прежде всего, необходимо вычислить количество шагов периодического процесса. На каждом шаге должно выполняться какое-либо действие процесса.

Далее необходимо задать начало работы процесса и его окончание, т.е. первый и последний шаг. Первый шаг процесса будет нажатие кнопки «Старт», для этого в проекты был создан вход «Start». Сигнал с этой кнопки связан с входом блока «SR» (переключатель с доминантой включения), а с выхода этого блока сигнал поступает на выход под названием «WORK» (рис. 2).

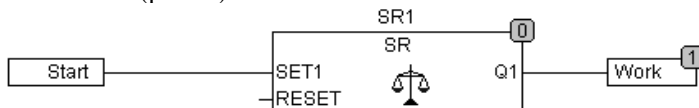


Рис. 2. Связь функциональных блоков

Для окончания процесса необходимо к входу RESET блока «SR» подключить блок «EQ» (двоичный оператор возвращает TRUE, если значение первого параметра равно второму), а на входы этого блока подключить переменные «Step» и «б», обозначающие шаги процесса и их количество (рис. 3).

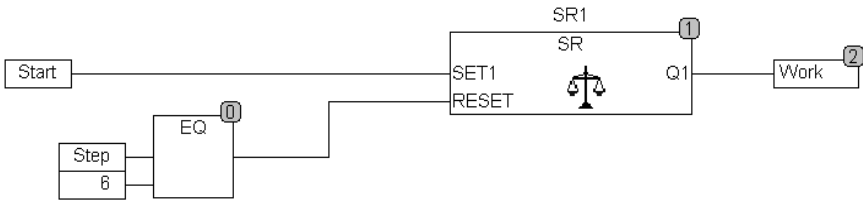


Рис. 3. Управление процессом

Надо отметить, что приведенные схемы – это лишь малая часть созданной программы. Объем программы не позволяет привести и описать ее полностью в данной статье, так как вся программа является слишком большой.

Для описания последовательности и работы шагов были использованы блоки «AND» (побитное И) и «MOVE» (присвоение значения одной переменной другой соответствующего типа).

Овладев основами программирования на языке CFC, студенты могут самостоятельно изменять временные интервалы и эмулировать процесс смешения компонентов (рис. 4).

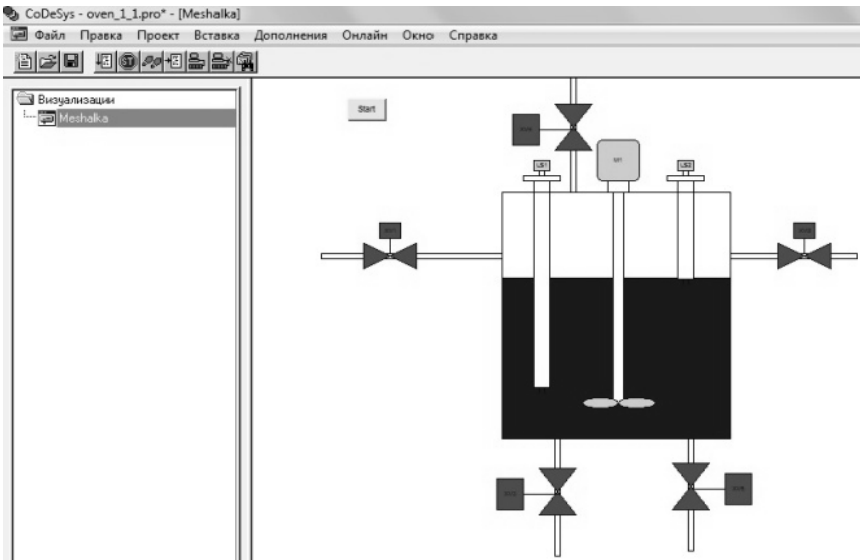


Рис. 4. Визуализация процесса смешения в CoDeSys



Приведенный на рис. 4 процесс – это процесс смешения, при котором происходит подача двух компонентов с последующим их смешением и выгрузкой, после чего происходит промывка емкости.

При достижении определенного уровня прекращается подача компонента *A* и происходит подача компонента *B* до тех пор, пока не будет достигнут определенный уровень. После загрузки емкости начинается смешение компонентов в течение определенного времени (время смешения задается). По окончании смешения происходит выгрузка продукта и промывка резервуара (рис. 4).

Созданная программа не подлежит загрузке ее в ПЛК. В программе создан виртуальный контроллер, который отрабатывает все команды.

Таким образом, данный эмулятор позволит студентам получить бесценный опыт в области программирования в среде CoDeSys с дальнейшим применением этих знаний в профессиональной деятельности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герке А.Р., Лира А.В. Роль и задачи подготовки студентов в лаборатории измерительных приборов современных технологических производств // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 276–278.
2. Герке А.Р., Лира А.В., Перухин М.Ю. Лабораторный учебный стенд для изучения метрологических характеристик приборов измерения давления // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. – Т. 16. – № 8. – С. 315–316.
3. Герке А.Р., Лира А.В. Основные направления при подготовке студентов в лаборатории измерительных приборов современных технологических производств // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т. 15. – № 21. – С. 212–213.
4. Хюпер Йоахим, Щедрин С. Микропроцессоры с функциональностью промышленных компьютеров // Компоненты и технологии. – 2009. – № 3. – С. 92–94.
5. Елов А., Добряин Д. Отечественный контроллер для ответственных применений // СТА. – 2015. – № 3. – С. 68–70.
6. Бармин А. ПЛК SLIO компании VIPA. Новый подход к управлению функционалом контроллера (часть 1) // СТА. – 2014. – № 1. – С. 78–81.
7. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 606 с.
8. Саданова Б.М., Олейникова А.В., Альберти И.В. и др. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза // Молодой ученый. – 2016. – № 4. – С. 71–74.

# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАБЛОННОГО АНАЛИЗА ОГРАНИЧЕННЫХ ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВЫХ ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ**

***Н.А. Прокопьев***

*Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия*

Автоматизированный контроль знаний обучающихся с использованием электронного тестирования является важным прикладным направлением в образовании в современную информационную эру. Обычно для реализации такого контроля знаний используются вопросы с вариантами ответа. Однако все еще малоизученным, согласно анализу [1–3] этой научной области, остается направление автоматизации проверки вопросов с открытым естественно-языковым ответом. Такого рода тестирование имеет свое применение, в особенности в гуманитарных и языковых учебных дисциплинах, где результаты тестов по вопросам с вариантами ответа зачастую не дают полной картины об уровне знаний обучающегося. В качестве основной модели при реализации модуля разбора ответов предлагается использовать теоретическую модель, описанную Д.Ш. Сулеймановым в [4].

## **Описание модели**

Основным методологическим принципом модели является утверждение о том, что вопрос задает ограниченный контекст ответа как по множеству вариантов ответа, так и по структуре. Из этого принципа следуют принципы реализации, заключающиеся в возможности задать шаблоны ответа, выделить из него семантические структурные единицы и таким образом свести задачу семантического анализа к классической задаче синтаксического разбора. Таким образом реализуется прагматически-ориентированный подход к анализу естественного языка, то есть реализация узкого, не универсального, ориентированного на решение конкретной задачи алгоритма разбора. Структура модуля разбора представлена на рис. 1.

Лексический процессор на входе получает ответ тестируемого и модель лексем для заданного вопроса. На выходе он формирует канонизи-

рованное представление ответа, содержащее частичный вектор ситуации, массив запрещенных лексем и массив неопределенных лексем из ответа, представление ответа в виде цепочки лексем. Модель лексем представляет собой перечисление соответствий между используемыми в шаблоне ответа лексемами и конкретными словами из естественного языка, которые ожидаются в ответе. Для представления ответа в виде цепочки лексем лексический процессор производит токенизацию ответа согласно модели лексем. Токены могут быть как одиночными (отдельные слова), так и композитными (словосочетания), определяется это также согласно модели лексем.



Рис. 1. Структура модуля анализа ответов

На вход семантического интерпретатора поступает канонизированное представление ответа и шаблон ответа на заданный вопрос. Интерпретатор проверяет соответствие цепочки лексем шаблону и на выходе формирует полный вектор ситуации. Этот вектор содержит данные о правильности ответа, о соответствии его контексту вопроса, о длине ответа, об использовании запрещенных лексем, о модальности ответа. Шаблон ответа представляет собой абстрактное синтаксическое дерево, узлами которого являются лексемы, перечисленные в модели лексем. Для каждого типа вопросов задается свой шаблон ответа. Проверка соответствия ответа шаблону происходит путем попытки обхода данного синтаксического дерева по узлам согласно канонизированному пред-

ставлению. Если обход завершается на конечном узле дерева (листе), то считается, что ответ соответствует шаблону. При обходе игнорируются неопределенные лексемы.

### Структура системы

Для работы модуля анализа естественно-языковых ответов необходимы некоторые метаданные о вопросах, включающие шаблон ответа, словарь лексем и базу знаний. Соответственно необходимы компоненты, позволяющие вносить эти метаданные. Предлагаются следующие компоненты системы:

1) Редактор онтологии. Данный компонент предназначен для создания и заполнения баз знаний. Каждая база знаний представлена в виде реляционной базы данных, хранящейся в файле формата SQLITE. В реляционную структуру погружена онтология предметной области, позволяющая хранить в базе данных словарь понятий из некоторой предметной области (например, из учебной дисциплины) и отношения между понятиями. Представление онтологии предметной области в виде реляционной базы данных основывается на подходе, предложенном в [5]. Структура одной базы знаний представлена на рис. 2. Таблицы «Сущность», «Объект», «Свойство», «Функция», «Определение сущности», «Цель функции» соответствуют словарям, остальные таблицы соответствуют отношениям между записями из словарей.



Рис. 2. Структура базы знаний

2) Генератор вопросов. Данный компонент реализует автоматическую генерацию вопросов по заполненной базе знаний с использованием шаблонов. Алгоритм данного генератора описан в [6]. Шаблон для генератора вопроса содержит в том числе и необходимые для анализа ответа метаданные, структура шаблона представлена на рис. 3.

**Название:** «Вопрос на определение»  
**SQL запрос:** "SELECT <поля> FROM <таблицы> WHERE <условия>"  
**Субъект вопроса:**  
  **Тип субъекта:** «Сущность»/«Функция»,  
  **Падеж (для сущностей):** «им»/«род»/«дат»/«вин»/«твор»/«пред»,  
  **Время (для функций):** «прош»/«наст»/«буд»  
  **Число:** «ед»/«мн»  
**Вопросительные слова:**  
  "<вопросительное слово>",  
  ["<вопросительное слово>"], ...  
**Наличие вопросительного знака:** true/false  
**Тип ответа:** «Сущность»/«Объект»/«Свойство»/  
  «Функция»/«Определение»/«Цель»  
**Онтологическая сложность:** A1/A2/B1/B2/C  
**Поля ответа:**  
  "<название поля, входящего в ответ>",  
  ["<название поля, входящего в ответ>"], ...  
**Шаблон ответа:** <абстрактное синтаксическое дерево>  
**Определение лексем:**  
  "<лексема>: <поле>/<слово>",  
  ["<лексема>: <поле>/<слово>"], ...

Рис. 3. Структура шаблона

При генерации вопроса производится SQL-запрос к базе знаний по некоторому отношению для получения эталонного ответа. Далее, если данный ответ получен, происходит замена одного из элементов отношения на вопросное слово и преобразование текста согласно грамматике. Таким образом получается новый вопрос. С вопросом связываются метаданные для ответа: шаблон ответа в виде абстрактного синтаксического дерева с лексемами в узлах и словарь лексем, в котором каждой лексеме из шаблона ответа сопоставляется множество нормализованных слов или словосочетаний.

3) Конструктор тестов. Данный компонент предназначен для преподавателей, в нем предоставляется удобный интерфейс для конструирования ветвящихся тестов с вероятностным характером появления вопросов.

4) Экзаменатор. Основной компонент для прохождения тестирования, содержащий модуль анализа ответов, проверки, накопления и анализа результатов. На основе собранной статистики результатов вычисляется сложность вопросов и составляется карта знаний учащегося, представляющая собой сопоставление каждой предметной области некоторой оценки знания из 100 %. Эти данные используются для возможной адаптации теста к способностям тестируемого, изменению сложности путем вариации вероятностей появления вопросов. Модуль адаптации теста также включен в данный компонент и реализован с использованием генетического алгоритма.

### Заключение

Предложенная система включает возможности по обширной автоматизации процессов электронного тестирования, а также предполагает дальнейшее развитие и применение ее в качестве источника экспериментальных данных для улучшения модуля анализа естественного языка, пополнения его шаблонами и типами вопросов. Для данной цели предполагается использование системы в режиме электронного образовательного ресурса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев А.А. Синтаксические и семантические модели и алгоритмы в задаче вопрос-ответного поиска // Материалы Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2011. – Воронеж, 2011.
2. Климов А.В. Разработка методов семантического анализа текстов при тестировании знаний человека // Материалы 51-й Международной студенческой конференции: «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2013. – С. 227.
3. Черепанова Ю.Ю. Контроль знаний с ответами на естественном языке // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/2 (40).
4. Сулейманов Д.Ш. Системы и информационные технологии обработки естественно-языковых текстов на основе прагматически-ориентированных лингвистических моделей: дис. докт. техн. наук. – Казань, 2000.
5. Казаков И.А., Манцивода А.В. Базы данных как онтологии // Известия Иркутского гос. университета. Сер. Математика. – 2011. – Т. 4. – № 1. – С. 20–30.
6. Аюпов М.М., Невзорова О.А., Прокопьев Н.А., Сулейманов Д.Ш. Семантические технологии генерации учебных вопросов // Труды Четырнадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – Т. 3. – С. 84–93.

# ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕГЛАМЕНТАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ\*

*С.Д. Старыгина, Н.К. Нуриев, Е.А. Печеный*

*Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань, Россия*

Дидактическая инженерия [1] как методология занимается решением педагогических проблем с использованием инженерных средств и методов, в частности с привлечением математического моделирования для организации диагностики качества подготовки студентов в реально-виртуальной среде. В рамках этой методологии может быть создано множество «высокоточных» метрико-ориентированных технологий быстрого профессионального развития через обучения, а также надежные с количественной оценкой точности системы диагностики. В целом, следует отметить, что в результате организации и освоения новой реально-виртуальной образовательной среды появились дидактические системы нового поколения. Эти системы с качественно новыми возможностями с технологией подготовки инженеров в метрическом компетентностном формате (МКФ). При подготовке инженеров в дидактических системах нового поколения с технологией обучения в МКФ необходимо как можно точнее установить метрики средств обучения. Это означает, что нужно численно оценить уровни развития профессионально-значимых способностей, сложность учебных проблем, задач, тестов и в целом учебного материала. Затем, с соблюдением известных из педагогической психологии основных закономерностей быстрого развития через обучение, необходимо построить технологию и «откалибровать» ее параметры соответствующими метриками, шкалами и значениями.

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-07-05761).

### Модель организации процесса тестирования

Формально общую модель технологии тестирования можно представить так:

$$\begin{aligned} Z1 &= F(Z, U, R, E), \\ U &= U(VAL, REL, REP, KSM(POL, CHL)), \\ R &= R(S, V). \end{aligned}$$

Все обозначения, принятые в модели, приведены в работе «Математическое моделирование измерительного средства педагогического тестирования».

Допустим, имеется тестовая система (инструментальное средство), где эксперт установил, что тестирующая система как инструмент имеет значения параметров:  $VAL = REL = REP = KSM = 1$ , т.е. в нашем распоряжении находится идеальный по содержанию тестирующий инструмент с показателем качества  $U = 1$ . Этот инструмент на конструктивном уровне также полностью защищен от фальсификации результатов, т.е. значение параметра  $E = 1$ . На базе этого инструмента необходимо организовать процесс тестирования с показателем качества  $R = R(S, V) \rightarrow 1$ . Эта цель может быть достигнута, если эксперт точно оценил сложность теста (значение параметра  $S$ ), а также необходимую продолжительность тестирования в зависимости от его сложности (значение параметра  $V$ ). Разумеется, что студенту для ответа на вопросы теста необходимо значительно больше времени, чем эксперту, т.е.  $V \gg S$ . При этом выбор времени  $V$  должен быть обоснован, так как излишнее увеличение времени  $V$  не приведет к улучшению значения качества ответов студента.

Очевидно, каждый студент в зависимости от его индивидуальных особенностей ответит на вопросы теста за разное время. Продолжительность ответа студента рассмотрим как случайную величину  $X$ . Следует особо подчеркнуть, что в данной работе авторы не интересуются причинами (их может быть много: психологических, интеллектуальных и т.д.), почему разные студенты имеют разные значения величины  $X$ , т.е. имеют разную продолжительность реакции ответов на вопросы теста, даже при наличии у них знаний одинокого качества. Отметим, что авторы владеют большими массивами статистических данных – значений случайной величины  $X$ .

Методика оценки сложности теста, т.е. величины  $S$  следующая. Эксперт получает случайный вариант теста и оценивает сложность каждого



вопроса по его трудоемкости (оценивается в минутах работы (мин/раб.) эксперта) (таблица).

**Пример бланка оценки трудоемкости теста экспертом**

№	Вопросы	Ответы	Сложность (мин/раб.)
1	Вопрос	Ответ	1
2	Вопрос	Ответ	3
3	Вопрос	Ответ	2
4	Вопрос	Ответ	1
...	...	...	...
10	Вопрос	Ответ	2
Сложность (трудоемкость) теста $S = 20$			

Таким образом, эксперт оценил сложность (трудоемкость) теста равным  $S = 20$  (мин/раб.).

Теперь оценим значение величины  $V$ , которая зависит от значения детерминированной величины  $S$  и случайной величины  $X$ . При этом случайная величина  $X$  может вести себя по-разному (иметь разный закон распределения) в зависимости от подготовленности студентов к тестированию. Если они не подготовлены или материал не из их «зоны ближайшего развития», то, как показывают экспериментальные данные, случайная величина  $X$  будет распределена по нормальному закону («белый шум» с распределением Гаусса) (рис. 1). На этом рисунке через  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  обозначены значения математических ожиданий.

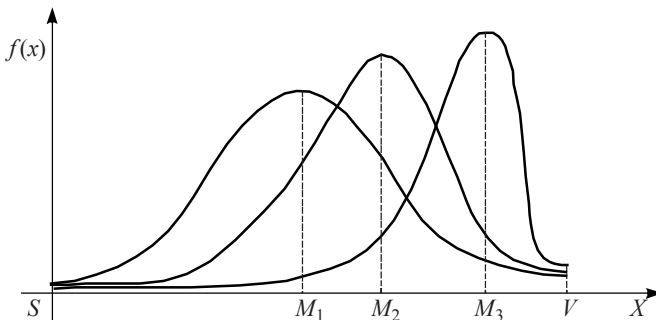


Рис. 1. Изменение закона распределения  $X$  в зависимости от подготовки

На основе статистического материала установим закон распределения случайной величины  $X$ . Для этого на специально сформированной шкале (рис. 2) отложим продолжительность тестирования (реакций) всех групп студентов.

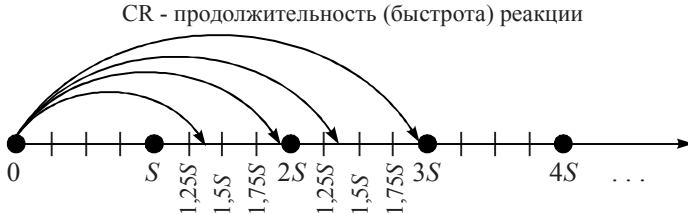


Рис. 2. Шкала для изменения быстроты (продолжительности) реакции студента

Для идентификации (определения) закона распределения рассмотрим экспериментальные данные, которые сформировались в системе MOODLE в течение 10 лет. В эксперименте участвовало 50 групп. Средняя численность студентов в одной группе 25 человек. Усредненные данные представлены на рис. 3.

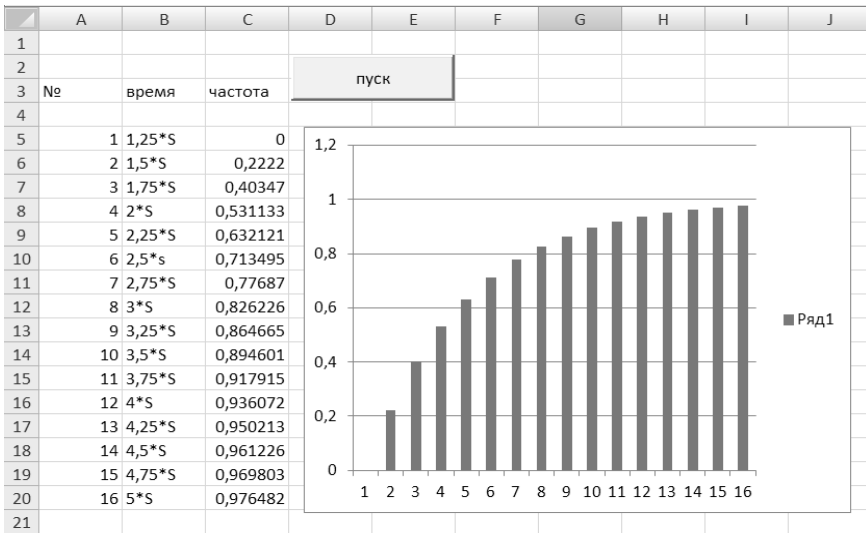


Рис. 3. Результат обработки экспериментальных данных (эмпирический закон распределения величины  $X$ )

Согласно данным рис. 3, частота (эмпирические вероятности) добровольного выхода студента из процесса (тестирования) будут следующие ( $X$  – случайная величина – время выхода по завершению теста):  $P(X < 1,25S) = 0$ , т.е. вероятность того, что студент завершит тест и выйдет с процесса тестирования раньше, чем  $1,25S$ , равна нулю, где  $S$  – сложность теста.  $P(X < 1,5S) = 0,2222$ , т.е. вероятность того, что студент завершит тест и выйдет с процесса тестирования раньше чем  $1,5S$ , равна  $0,22$  (22%).

Аналогично:  $P(X < 1,75S) = 0,40$ ;  $P(X < 2S) = 0,51$ , т.е. ко времени  $2S$ , завершив процесс, выйдут чуть больше половины студентов и т.д.

Из графика следует, что активное время выхода студентов по завершении теста (продолжительность самообслуживания) начинается с момента времени  $S$  и продолжается до момента  $V$  (где момент  $V$  – конец обслуживания). Поэтому можно начало координат на графике перенести на момент  $S$ , так как до момента  $S$  никто не завершает тестирование (рис. 3). Как следует из частотной характеристики случайной величины  $X$  (интегральная характеристика), средняя продолжительность самообслуживания (тестирования) в активной зоне равна величине  $T(\text{cp}) = S$ .

Из статистического анализа данных (см. рис. 3) следует, что при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  (гипотеза проверялась по критерию  $\chi^2$ ) случайная величина  $X$  подчиняется экспоненциальному закону распределения с интенсивностью потока равным  $\lambda = 1/T(\text{cp}) = 1/S$ , т.е.

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Из этого следует, что поток самообслуживающихся студентов является пуассоновским потоком.

Из тех же рассмотренных экспериментальных данных известно, что в среднем из группы с 25 студентами тест на положительную оценку не могут сдать 3,5 студента, независимо от продолжительности времени  $V$ , это означает, что 14 % студентов сдают тест на «два». Исходя из этой информации и данных графика, находим, что  $V = 3S$ .

Таким образом, если, по мнению эксперта, у теста как инструментального средства показателя  $U = E = 1$ , то ошибка оценки качества усвоенных знаний студента при продолжительности тестирования  $V = 3S$  не превышает 5 %, где  $S$  – сложность (трудоемкость) теста. Этот результат формально можно записать так:  $\Delta Z = \text{abs}(Z1 - Z) \leq 0,05$ , т.е. надежность показателя  $Z1$  как оценки теста не менее 95 %.

### Заключение

Итак, исходя из результатов исследований, следует, что при выполнении всех перечисленных условий к тесту как измерительному средству педагог должен действовать по следующему алгоритму:

1. Эксперт (педагог) должен оценить  $S$  – сложность (трудоемкость в мин/раб.) теста.

2. Положить продолжительность (трудоемкость) тестирования  $V = 3S$  (мин/раб.).

Как показывает опыт, полученную эвристическую формулу  $V = 3S$  (обоснованная продолжительность тестирования) можно использовать только в ограниченном диапазоне измерений  $S$ . Экспериментально установлено, что этот диапазон равен  $0 < S \leq 20$  мин. При больших значениях  $S$ , т.е.  $S > 20$ , погрешность оценки результата  $\Delta Z$  достаточно быстро возрастает. По нашей гипотезе, появляется новый фактор – усталость студента.

В общем случае, в результате системного анализа, было установлено неравенство Стнупе [2]:

$$V - S > 2T(\text{cp}).$$

Это неравенство устанавливает количественное соотношение между величинами  $T(\text{cp})$ ,  $V$ ,  $S$  которое, например, при известных  $T(\text{cp})$ ,  $S$  позволяет установить наименьшее допустимое значение продолжительности тестирования  $V$ . В частности, при  $T(\text{cp}) = S$  получаем ранее приведенное правило  $V = 3S$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Нуриев Н.К., Журбенко Л.Н., Шакиров Р.Ф. и др. Методология проектирования дидактических систем нового поколения. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 456 с.
2. Старыгина С.Д., Нуриев Н.К., Печеный Е.А. Дидактическая инженерия: Оценка сложности и продолжительности теста достижений // Science of Europe. – 2017. – V. 2. – No. 14. – P. 17–21.

# ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ\*

*С.Д. Старыгина, Е.А. Печеный, Н.К. Нуриев*

*Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань, Россия*

Как показывает практика, на современном этапе развития образования многие задачи дидактики не могут быть решены в рамках только педагогики, так как сегодня студент занимается учебной деятельностью в реально-виртуальном образовательном пространстве (преимущественно в техногенной среде). Для решения таких задач приходится наряду с педагогическими методами привлекать инженерные методы. В связи с этим в дидактике возникла новая методология, т.е. новый раздел науки об организации учебной деятельности с использованием инженерных методов и средств. Эту методологию назвали «Дидактической инженерией» [1]. Многие проблемы дидактической инженерии решаются с привлечением методов математического моделирования [2, 3].

## Математическая модель

Поставим цель: спроектировать технологию для педагогического тестирования, при котором

$$dZ = \text{abs}(Z - Z1) \rightarrow 0,$$

где  $dZ$  – точность результата тестирования;  $Z$  – латентный (скрытый) показатель качества, усвоенного учебного материала студентом;  $Z1$  – установленный путем тестирования результат, т.е. выявленный показатель качества усвоенного материала.

Рассмотрим модель технологии тестирования, в которой точность  $dZ$  результата тестирования  $Z1$  зависит: 1) от показателя точности тестовой системы как инструментального измерительного средства (параметр  $U$ ); 2) корректности организации процесса тестирования (параметр  $R$ ); 3) защищенности от фальсификации (параметр  $E$ ).

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-07-05761).

Формально модель технологии тестирования можно представить так:

$$ZI = F(Z, U, R, E),$$

$$U = U(VAL, REL, REP, KSM(POL, CHL)),$$

$$R = R(S, V),$$

где  $F(*)$ ,  $U(*)$ ,  $R(*)$  – функционалы, описывающие влияние перечисленных факторов на результат тестирования;  $U$  – характеристика качества тестирующей системы как инструментального средства, который зависит от  $VAL$  – показателя валидности теста по содержанию (может принять любое значение от 0 до 1). Показатель равный 1 означает, что, по мнению эксперта, вопросы теста корректно и целесообразно сформулированы для оценки качества усвоенных знаний;  $REL$  – показатель релевантности (изменяется от 0 до 1), т.е. этот показатель характеризует, насколько вопросы принадлежат тестируемой предметной области. Показатель равен 1, если, по мнению эксперта, вопросы полностью из тестируемой предметной области;  $REP$  – показатель репрезентативности или представительности (изменяется от 0 до 1) т.е. все аспекты (части) изучаемой предметной области, по мнению эксперта, отражены и представлены в тесте;  $RSM$  – коэффициент «смещения» количества вопросов теста к какому-то типу, т.е. тест считается не смещенным ( $RSM = 1$ ), если количество вопросов, проверяющих качество полноты ( $POL$ ) владения знаниями, равно количеству вопросов, проверяющих качество целостности ( $CHL$ ) владения им знаниями. На практике это означает, что вопросы специально сформированы для оценки наличия у студента знаний этих двух типов.  $POL$  – тип вопросов, которые позволяют выявить знания конкретных данных, определений, понятий, объектов из изучаемой (осваиваемой) предметной области (такого типа знания поддерживает клиповой образ мышление).  $CHL$  – тип вопросов, направленных для установления наличия знаний о целостности предметной области (поддерживает понятийный образ мышления). Этот тип вопросов предназначен для оценки знаний причинно-следственных связей между объектами, явлениями, понятиями, процессами, методами, технологиями и в целом организационной структуры (целостности) осваиваемой предметной области. Ответы на этот тип вопросов характеризуют не только наличие разрозненных знаний, но и понимания целостной (системной) организации предметной области. Будем считать, что в нормированном на полноту и целостность тесте должно быть 50 % вопросов на полноту и 50 % на целостность. Этот факт эксперт фиксирует как

$POL = CHL = 0,5$ . Если имеется «перекос» по типу вопросов, то этот факт отмечается, например, как  $POL = 0,8$ ;  $CHL = 0,2$  (80 % вопросов на  $POL$  и 20% на  $CHL$ ).  $R$  – характеристика качества организации самой процедуры тестирования, которая, в свою очередь, зависит от параметров:  $S$  – мера сложности теста,  $V$  – мера продолжительности времени, отведенного на тестирование.  $E$  – показатель защищенности результатов тестовой системы от фальсификации, который зависит от возможности угадывания ответов, количества заданных вопросов, количества однородных вопросов в базе для случайного выбора. В данной работе значение показателя оценивается экспертом в интервале от 0 до 1.

Тестирование считается реализованной по идеальной технологии, если результат  $Z1$  получен в процессе тестирования с показателями

$$Z1 = F(Z, 1, 1, 1).$$

Тестирование, организованное по идеальной технологии, обеспечивает достижение результата по критерию, указанному в цели, т.е.

$$dZ = \text{abs}(Z - Z1) = 0.$$

### Модель оценки параметра $U$ – качества содержания инструментального средства

Как следует из модели, качество инструментального измерительного средства тестирования зависит от значений параметров  $VAL$ ,  $REL$ ,  $REP$ ,  $KSM$  ( $POL$ ,  $CHL$ ). Оценка значений этих параметров производится экспертом (группой экспертов) по определенному алгоритму. Этот алгоритм распишем на примере с конкретными размерностями.

Рассмотрим ситуацию: допустим, студенты (25 человек) к назначенному сроку должны усвоить учебный материал из определенной темы, который состоит из четырех разделов. Тест, предназначенный для оценки качества усвоенных знаний, состоит из 12 вопросов.

Раздельно рассмотрим методики экспертизы одним экспертом и группой экспертов.

Методика экспертизы одним экспертом. Результаты оценок эксперта сформируем в специальную таблицу (табл. 1).

Методика расчета показателей

1)  $VAL$ : Сред. ариф. =  $(1+0,8+0,7+0,9+1+1+1+0,9+0,8+1+1+1)/12 = 0,925$ .

2)  $REL$ : Сред. ариф. =  $(1+1+1+1+0,9+0,8+1+1+1+1+1+1)/12 = 0,975$ .

3)  $REP$ : вычисление сводной таблицы (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

## Результаты оценок эксперта

№	Вопросы	Показатели				
		<i>VAL</i>	<i>REL</i>	Номер раздела	Вопрос типа <i>POL</i>	Вопрос типа <i>POL</i>
1	Вопрос 1	1	1	1	1	
2	Вопрос 2	0,8	1	1	1	
3	Вопрос 3	0,7	1	2	1	
4	Вопрос 4	0,9	1	3	1	
5	Вопрос 5	1	0,9	2	1	
6	Вопрос 6	1	0,8	2	1	
7	Вопрос 7	1	1	2	1	
8	Вопрос 8	0,9	1	2	1	
9	Вопрос 9	0,8	1	4	1	
10	Вопрос 10	1	1	1	1	
11	Вопрос 11	1	1	2		1
12	Вопрос 12	1	1	3		1
Среднее значение		<b>0,925</b>	<b>0,975</b>			
Значение <i>REP</i>				<b>0,49</b>		
Количество					10	2
Коэффициент переноса <i>KSM</i>						<b>0,2</b>

Т а б л и ц а 2

## Вычисление значений невязки

Номер раздела	Количество вопросов	Значение невязки как часть из 12 вопросов
1	3	3/12 = 0,25
2	6	6/12 = 0,5
3	2	2/12 = 0,16
4	1	1/12 = 0,08

Суммарное значение невязки

$$\varepsilon = (0,25 - 0,25) + (0,5 - 0,25) + (0,25 - 0,16) + (0,25 - 0,08) = 0,51$$

$$REP = 1 - \varepsilon = 1 - 0,51 = 0,49.$$

4) Коэффициент перекося

$$KSM = 2/10 = 0,2.$$

Качество тестовой системы как инструментального средства рассчитывается как среднее геометрическое:

$$U = \sqrt[4]{VAL \cdot REL \cdot REP \cdot KSM} = \sqrt[4]{0,925 \cdot 0,975 \cdot 0,49 \cdot 0,2} = 0,55.$$



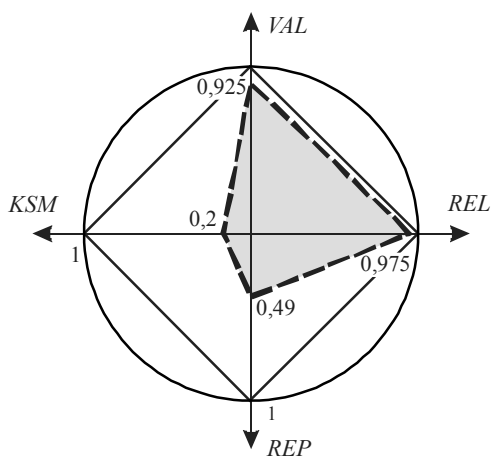


Рис. 1. Диаграмма Кивиата, характеризующая отличие реального инструментального измерительного средства от идеального

$E = 1$ ). В рассмотренном случае было установлено, что тестирование будет реализовано по технологии с низким значением параметра  $U$ , т.е. со значениями параметров  $Z1 = F(Z, U = 0,55, R, E)$ . Методика оценки значения параметра  $R$  приводится в работе [4].

Таким образом, величина  $U$  как показателя качества тестовой системы (инструментального средства) равна 0,55, т.е. составляет 55 % из возможных 100 %.

Графически состояния качества инструментального средства можно показать с помощью диаграммы Кивиата (рис. 1).

### Заключение

Таким образом, тестирование, проведенное по идеальной технологии, имеет следующие значения параметров:  $Z1 = F(Z, U = 1, R = 1,$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чошанов М.А. Дидактика и инженерия. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 248 с.
2. Нуриев Н.К., Старыгина С.Д., Гибадуллина Э.А. Дидактическая инженерия: проектирование систем обучения нового поколения // Интеграция образования. – 2016. – Т. 20. – № 3 (84). – С. 393–406. DOI: 10.15507/1991-9468.084.020.201603.393-406.
3. Нуриев Н.К., Старыгина С.Д. Дидактическая инженерия: подготовка инженеров в техногенной образовательной среде // Образование и наука. – 2016. – № 9 (138). – С. 61–79. DOI: 10.17853/1994-5639-2016-9-61-79.
4. Старыгина С.Д., Нуриев Н.К., Печень Е.А. Построение математической модели процесса регламентации педагогического тестирования // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017): Материалы XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (29 сентября – 3 октября 2017 г.). – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Ч. 2. – С. 223–228.

# **ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ»**

*Н.Д. Шигапова, А.С. Понкратов, Л.Ю. Кошкина*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия*

Ежегодно на базе ФГБОУ ВО «КНИТУ» проводится Международная конференция молодых учёных «Пищевые технологии и биотехнологии», для участия в которой приглашаются студенты, аспиранты, сотрудники вузов, предприятий и исследовательских центров РФ, всего мирового сообщества, работающих в области биотехнологии и пищевой отрасли.

В рамках конференции проходит отбор участников Программы «УМНИК» и Фестиваль инновационных продуктов «Спектр вкуса». Лучшие доклады конференции рекомендуются к публикации в научном журнале «Вестник Казанского технологического университета» согласно его рубрикации, а также награждаются.

В оргкомитет входят сотрудники ФГБОУ ВО «КНИТУ». Поддержку в проведении конференции оказывают спонсоры.

С целью повышения эффективности деятельности конференции, сокращения времени выполнения типовых операций по обработке поступающих заявок, материалов, своевременной выдачи отчетов требуется разработать информационную систему Международной конференции молодых учёных «Пищевые технологии и биотехнологии».

Успешная реализация проекта информационной системы возможна, в первую очередь, при адекватном описании. Для этого должны быть построены полные и непротиворечивые функциональные и информационные модели [1, 2]. К этой логически сложной, трудоемкой, длительной по времени работе в процессе создания и функционирования информационной системы могут добавляться изменения, уточнения вследствие растущих информационных потребностей пользователей.

Онтология – это формализованное представление некоторой предметной области, которое включает словарь-указатель терминов предметной области (концептов) и логические связи между ними (отношения) [3].

При создании онтологии данной предметной области, в первую очередь, следует составить глоссарий, то есть список всех терминов [4], которые имеют отношение к рассматриваемой предметной области.

### Г л о с с а р и й

**КОНФЕРЕНЦИЯ** – собрание, совещание представителей каких-нибудь государств, научных, общественных, учебных организаций для обсуждения каких-либо особых вопросов.

**СЕКЦИЯ** – подразделение в составе какого-нибудь учреждения, организации, в работе конференции, съезда.

**УЧАСТНИКИ** – студенты, аспиранты, сотрудники ВУЗов, предприятий отрасли и исследовательских центров РФ и всего мирового сообщества, область интересов которых находится в пищевой технологии и биотехнологии.

**ЗАЯВКА** – заблаговременное уведомление, составленное в устной или письменной форме, информирующее организаторов о намерении, желании участвовать в конкурсе, научном, образовательном мероприятии.

**ДОКЛАД** – публичное сообщение, развернутое изложение какой-нибудь темы.

**АВТОР** – участник, лицо написавшее и представляющее на мероприятии свой труд, в материалах указан первым в списке авторов.

**ОРГАНИЗАЦИЯ** – компания, корпорация, фирма, предприятие или учреждение, или их подразделения, объединенные или нет, общественные или частные, выполняющие самостоятельные функции и имеющие администрацию.

**СПОНСОР** – лицо, организация, фирма, выступающие как поручитель, заказчик, устроитель, финансирующая сторона.

**ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ** – один лист, часто сложенный вдвое или втрое, формат которого может меняться в широких пределах, в котором обязательно должны быть указаны:

- название конференции и эмблема, дата и место проведения;
- организаторы конференции, тематические направления, контактные номера телефонов и факсов, адреса (почтовые и электронные) и адрес сайта конференции, где доступна более подробная информация;
- информация о том, где и как можно зарегистрироваться для участия в конференции, а также что и в какие сроки нужно представить;
- рабочий язык конференции, а также информация о том, где и как будут опубликованы материалы конференции [5].

**ПРИКАЗ** – это правовой акт, который создается единолично руководителем организации (лицом, исполняющим его обязанности), в целях разрешения вопросов основной деятельности или по личному составу.

**ПРОГРАММА «УМНИК»** – программа, организуемая Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Роснауки и Рособразования.

**СПЕКТР ВКУСА** – фестиваль инновационных продуктов питания, в котором необходимо предоставить краткое описание продукта и образцы для дегустации.

**ИЗДЕЛИЕ** – единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках (экземплярах).

**УЧАСТИЕ** – сотрудничество, деятельность по совместному выполнению какого-нибудь общего дела.

**ФУНКЦИЯ** – деятельность, обязанность, работа.

**АУДИТОРИЯ** – зал для чтения лекций и собрание людей, их слушающее.

**ДОЛЖНОСТЬ** – установленная в определенном порядке первичная структурная единица штатного расписания той или иной государственной или негосударственной организации, определяющая содержание и объем полномочий, размер денежного содержания и место в иерархической структуре организации лица, ее замещающего.

**ГОСТИНИЦА** – жильё для временного проживания приезжающих с одноместными или неодноместными номерами, с обслуживанием.

**ПРОЖИВАНИЕ** – факт проживания в определенном месте в течение некоторого времени; место фактического проживания, отличное от местожительства.

Составив список терминов предметной области, необходимо выделить классы, подклассы, а также свойства классов.

В данной предметной области выделены следующие классы: КОНФЕРЕНЦИЯ (Conference), СЕКЦИЯ (Section), ДОКЛАД (Report), ПЕРСОНА (Person), УМНИК (Umnik), СПЕКТР\_ВКУСА (Spectr\_of\_taste), ПРИКАЗ (Decree), СПОНСОР (Sponsor), НАГРАДА (Reward), ГОСТИНИЦА (Hotel). Подклассами являются ОРГАНИЗАТОР и УЧАСТНИК, которые относятся к классу ПЕРСОНА.

Графическое построение онтологической модели осуществлено в пакете Protege версии 5.0, являющемся свободным программным средством с открытым исходным кодом для редактирования онтологий и систем управления знаниями.

Зададим прямые и обратные связи между всеми классами (рис. 1).

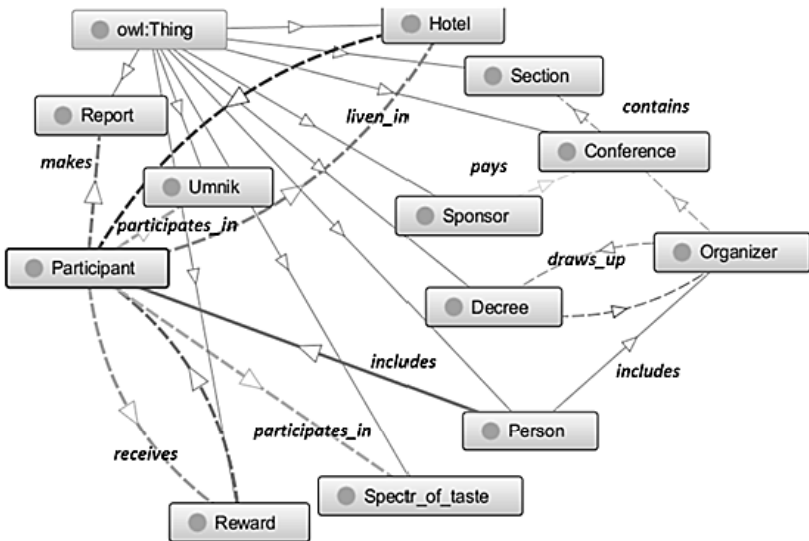


Рис. 1. Фрагмент онтологической модели предметной области

Подкласс УЧАСТНИК (Participant) связан с классами УМНИК (Umnik) и СПЕКТР\_ВКУСА (Spectr\_of\_taste) отношением типа:

*участвует (participates\_in).*

УЧАСТНИК (Participant) связан с НАГРАДАМИ (Reward) обратной связью и, следовательно, отношениями типа:

*получает (receives)/ выдается (is\_given\_out).*

УЧАСТНИК (Participant) связан с ГОСТИНИЦАМИ (Hotel) обратной связью и отношениями типа:

*проживает (lives\_in) /заселяется (is\_populated\_by).*

УЧАСТНИК (Participant) связан с ДОКЛАДАМИ (Report) отношением типа:

*делает (makes).*

Подкласс ОРГАНИЗАТОР (Organizer) связан с ПРИКАЗАМИ (Decree) обратной связью и отношениями типа:

*составляет (draws\_up) /издается (is\_issued).*

ОРГАНИЗАТОР (Organizer) связан с КОНФЕРЕНЦИЯМИ (Conference) отношением типа:

*организует (organizes).*

СПОНСОР (Sponsor) связан с КОНФЕРЕНЦИЯМИ (Conference) отношением типа:

*оплачивает (pays).*

КОНФЕРЕНЦИЯ (Conference) связан с классом СЕКЦИЯ (Section) отношением типа:

*включает (contains).*

В результате поэтапно разработана и выполнена онтологическая модель предметной области «Международная конференция молодых ученых “Пищевые технологии и биотехнологии”».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кошкина Л.Ю., Сафонова Т.В., Понкратов А.С. Повышение эффективности научно-исследовательской деятельности студентов в решении задач энергоресурсосбережения // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 23. – С. 485–489.
2. Кошкина Л.Ю., Емельянов В.М., Кошкина К.В. Проектирование реляционной базы данных для мероприятий повышения квалификации в области энергоресурсосберегающих технологий // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 20. – С. 353–357.
3. Мирошников В.В., Булатецкий Д.И. Онтологическая модель системы управления знаниями в области качества // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – № 4 (24).
4. Амосова Е.С. Разработка онтологической модели предметной области «Инновационные разработки в научных исследованиях» // Информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 42–45.
5. Конференции.ru [Электронный ресурс]. – URL: <http://konferencii.ru/news/6>

# ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛНЕНИЯ SQL-ЗАПРОСОВ К БАЗАМ ДАННЫХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ MYSQL

*Г.Н. Ямалева<sup>1</sup>, М.Ю. Перухин<sup>1</sup>, Р.Ф. Гибадуллин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань, Россия*

*<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Обработка запроса к объемной базе данных может занимать значительное время. Ускорение данного процесса связывается с применением индексов.

Базы данных (БД) являются компонентой различных информационных систем. Для получения необходимой информации к ним составляются запросы по требуемым критериям. Работа с базами данных малых объемов может проходить быстро, но при больших их объемах время выполнения запросов может занимать значительное время и снизить производительность используемого продукта. Чтобы повысить производительность приложений, запросы можно оптимизировать с помощью индексов. Индексы представляют собой структуры, которые позволяют СУБД эффективно извлекать данные по критерию быстродействия [1–3].

Рассмотрим приемы работы с индексами на примере СУБД MySQL.

Индексы типа BТREE в MySQL позволяют быстро просматривать информацию, содержащуюся в своих префиксах и перебирать диапазоны отсортированных значений.

Интересным является вопрос: «Какие могут быть варианты у MySQL, если было создано два отдельных индекса?» Первый способ заключается в использовании только одного индекса, чтобы отобразить подходящие строки и далее отфильтровать извлеченные данные, руководствуясь WHERE без применения индексов. Второй способ связан с получением указателей на строки от всех подходящих индексов и вычислением их пересечения, чтобы вернуть результирующие данные.

Лучший способ зависит от избирательности и корреляции индексов. Применение пересечения имеет смысл, если после отработки WHERE по первой колонке будет отобрано 5% строк, а по второй колонке – до

1 % от общего количества. В ином случае, когда по второй колонке будет отфильтровано до 5 %, то обычно значительно выгоднее использовать только первый индекс и отфильтровать ненужные строки после извлечения данных.

Создадим тестовую базу данных:

```
CREATE TABLE `idxtest` (
  `i1` int(10) UNSIGNED NOT NULL,
  `i2` int(10) UNSIGNED NOT NULL,
  `val` varchar(40) DEFAULT NULL,
  KEY `i1` (`i1`),
  KEY `i2` (`i2`),
  KEY `combined` (`i1`,`i2`)
) ENGINE = MyISAM DEFAULT CHARSET = latin1
```

Сгенерируем базу таким образом, что каждая из колонок `i1` и `i2` будет отбирать около 1 % строк в таблице. Число кортежей в общей сложности – 10 млн.

При выполнении запроса

```
SELECT avg(length(val)) FROM idxtest WHERE i1 = 50 AND i2 = 50;
```

был использован комбинированный индекс, и время исполнения запроса составило менее 10 мс.

Зададим оптимизатору ограничение по использованию комбинированного индекса и выполним запрос в следующем виде:

```
SELECT avg(length(val)) FROM idxtest IGNORE INDEX (combined)
WHERE i1 = 50 AND i2 = 50;
```

MySQL использовал пересечение индексов, и время обработки запроса составило 70 мс, что в 7 раз дольше предыдущего примера.

Рассмотрим еще один вариант, когда будет использоваться только один индекс с последующей фильтрацией полученных данных:

```
SELECT avg(length(val)) FROM idxtest IGNORE INDEX (combined,i2)
WHERE i1 = 50 AND i2 = 50;
```

Выполнение запроса заняло 290 мс, так как на этот раз СУБД пришлось пройти по большему числу строк.

Таким образом, вместо одного индекса предпочтительнее использовать пересечение индексов. Однако для рассмотренных случаев лучшие результаты по быстродействию получены все же при использовании комбинированных индексов.



ЛИТЕРАТУРА

1. *MySQL*. Оптимизация производительности. – 2-е изд.: пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2010. – 832 с.
2. *Гибадуллин Р.Ф., Савельев А.Г., Перухин М.Ю.* Ускорение обработки SQL-запросов к базам данных на GPU посредством аппаратно-программной платформы NVIDIA CUDA // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2016. – № 20. – С. 110–116.
3. *Гибадуллин Р.Ф., Леонов А.Д., Перухин М.Ю.* Разделение пространственных данных для масштабируемой обработки запросов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2017. – Т. 20. – № 8. – С. 83–86.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

*М.А. Алексеенко, И.Ю. Гендрина*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В последнее время в связи с обилием различного рода данных наблюдений в системах видения через атмосферу и необходимостью их обработки актуальным является использование при изучении таких систем различных методов статистического исследования: корреляционно-регрессионного анализа, динамических рядов, дисперсионного анализа и т.д. Предпринята попытка применить элементы корреляционно-регрессионного анализа для изучения и последующего прогнозирования закономерностей переноса излучения в таких системах также, как это делают при построении радиационных моделей атмосферы. В настоящей работе представлены некоторые результаты статистической обработки результатов численного моделирования характеристик систем видения через атмосферу, полученных с помощью программного комплекса [1].

Под системой видения понимают схему наблюдения, включающую в себя подстилающую поверхность, «мутную среду» (атмосферу) и оптическое устройство, осуществляющее регистрацию приходящего излучения. Для изучения переноса излучения в таких системах традиционно используется теория систем и теория переноса излучения [2].

Модель атмосферы включает в себя следующие характеристики: полный коэффициент ослабления  $\sigma(\lambda, \vec{r}) = \sigma_{sc}(\lambda, \vec{r}) + \sigma_a(\lambda, \vec{r})$ , где  $\sigma_{sc}$  – коэффициент рассеяния;  $\sigma_a$  – коэффициент поглощения;  $g(\lambda, \mu, \vec{r})$  – индикатриса рассеяния. Здесь  $\vec{r} = (x, y, z)$  – радиус-вектор текущей

точки в пространстве,  $\mu(\vec{\omega}', \vec{\omega})$  – косинус угла рассеяния излучения, пришедшего с направления  $\vec{\omega}'$ , в направлении  $\vec{\omega}$ ;  $\lambda$  – длина волны падающего излучения.

В работе рассматривается вертикально ограниченная плоскопараллельная аэрозольно-молекулярная модель атмосферы, включающая слой сплошной облачности. Для облачного слоя предполагается задание собственных оптических характеристик: коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрисы рассеяния.

Геометрическая схема расчетов такова: на нижней границе атмосферы (на подстилающей поверхности  $z = 0$ ) находится точечный источник единичной мощности, на верхней границе атмосферы ( $z = 30 \text{ km}$ ) – идеальный оптический приемник, который может принимать рассеянное излучение, приходящее с различных направлений (углов наблюдения). Яркость рассеянного излучения является решением интегродифференциального уравнения переноса [3], которое практически может быть решено только приближенными или численными методами.

Одним из наиболее универсальных методов решения поставленной задачи является метод имитационного моделирования, или метод Монте-Карло. Основой метода Монте-Карло является интегральное уравнение переноса 2-го рода с обобщенным ядром для плотности столкновений частиц [3]:

$$f(\vec{x}) = \int_X k(\vec{x}', \vec{x}) f(\vec{x}') d\vec{x}' + \psi(\vec{x}), \quad f = Kf + \psi.$$

Здесь  $\vec{x} = (\vec{r}, \vec{\omega})$  – точка фазового пространства координат и направлений;  $\psi(\vec{x})$  – функция источников;  $K$  – интегральный оператор с ядром  $k(\vec{x}', \vec{x})$ :

$$k(\vec{x}', \vec{x}) = \frac{\sigma_{sc}(\vec{r}) \cdot g(\mu) \exp(-\tau(\vec{r}', \vec{r})) \sigma(\vec{r})}{\sigma(\vec{r}') 2\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^2} \delta\left(\vec{\omega} - \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}\right).$$

В работе был использован один из алгоритмов метода Монте-Карло – метод локальной оценки [3].

Алгоритм локальной оценки заключается в расчете следующего функционала:

$$J(\Omega_i) = \int_{\Omega_i} \Phi(\vec{r}^*, \vec{\omega}^*) d\vec{\omega}^* = \int_X l_i(\vec{x}', \vec{x}^*) f(\vec{x}') d\vec{x}' = M \sum_{n=0}^N Q_n \cdot l_i(\vec{x}_n, \vec{x}^*); \quad (1)$$

$$I_i(\vec{x}, \vec{x}^*) = \frac{\exp(-\tau(\vec{r}, \vec{r}^*)) \cdot g(\mu^*)}{2\pi |\vec{r} - \vec{r}^*|^2} \Delta_i(\vec{s}^*). \quad (2)$$

Здесь  $\vec{s}^* = \frac{\vec{r}^* - \vec{r}}{|\vec{r}^* - \vec{r}|}$ ;  $\mu^* = (\vec{\omega}, \vec{s}^*)$ ;  $\Delta_i(\vec{s})$  – индикатор области  $\Omega_i$ ;  $\Phi$  – по-

ток частиц в заданной точке  $\vec{x}^*$ ;  $Q_n$  – вес частицы;  $f(\vec{x})$  – плотность столкновений.

Количественные значения яркости рассеянного излучения для безоблачной атмосферы приведены в [4]. Аналогичные значения для облачной атмосферы даны в табл. 1.

Таблица 1

**Яркость рассеянного излучения для атмосферы  
с облачным слоем типа «Дымка Н», Вт/(мкм · м<sup>2</sup> · ср)**

Углы приема, град	Длина волны, мкм						
	$\lambda=0,374$	$\lambda=0,530$	$\lambda=0,694$	$\lambda=0,860$	$\lambda=1,060$	$\lambda=3,390$	$\lambda=10,60$
4,5	2,24E-05	1,67E-05	1,38E-05	1,13E-05	1,19E-05	5,55E-06	3,51E-06
13,5	1,09E-06	7,65E-07	6,60E-07	5,30E-07	4,56E-07	2,09E-07	1,43E-07
22,5	2,23E-07	1,83E-07	1,55E-07	1,39E-07	1,12E-07	4,84E-08	3,51E-08
31,5	8,44E-08	5,63E-08	5,54E-08	4,73E-08	3,85E-08	1,95E-08	1,32E-08
40,5	3,49E-08	2,73E-08	2,81E-08	6,65E-08	4,33E-08	8,70E-09	5,38E-09
49,5	1,86E-08	5,15E-08	1,54E-08	1,18E-08	9,30E-09	4,23E-09	4,59E-09
58,5	1,30E-08	1,10E-08	1,71E-08	7,75E-09	6,64E-09	3,58E-09	3,57E-09
67,5	1,94E-08	1,12E-08	7,95E-09	2,11E-08	1,73E-08	8,16E-08	6,37E-09
76,5	1,58E-07	2,13E-08	4,96E-09	3,68E-09	2,90E-09	1,99E-09	1,18E-09
85,5	1,20E-08	6,37E-09	1,23E-09	1,03E-09	1,00E-09	5,13E-11	1,16E-11

Для установления функциональной связи между угловым распределением яркости и оптическими параметрами был применен регрессионный анализ, который широко используется для восстановления характеристик аэрозоля и облачности, а также для оценки их влияния на климат [5].

Уравнение регрессии для углового распределения яркости в аэрозольно-молекулярной и облачной атмосфере относительно длины волны падающего излучения было получено в виде  $y = \frac{b_1}{x} + b_0$  для всех уг-

лов приема. Регрессионные коэффициенты для облачной атмосферы, а также коэффициенты детерминации приведены в табл. 2.

Уравнение регрессии для углового распределения яркости в облачной атмосфере относительно высоты верхней границы облачного слоя было получено в виде  $y = b_1x + b_0$  для всех углов приема. Регрессионные коэффициенты для облачной атмосферы, а также коэффициенты детерминации приведены в табл. 3.

Статистическая оценка полученных уравнений регрессии на значимость была проведена на основе  $F$ -критерия и оценки коэффициента детерминации. С уверенностью 90 % можно утверждать, что рассмотренные зависимости являются статистически значимыми.

Т а б л и ц а 2

**Коэффициенты уравнения регрессии яркости от длины волны для облачной атмосферы**

Углы приема, град	Коэффициент $b_0$	Коэффициент $b_1$	Коэффициент детерминации, $R^2$
4,5	3,52E-06	7,12E-06	0,985
13,5	1,08E-07	3,63E-07	0,997
22,5	3,63E-08	7,53E-08	0,973
31,5	1,26E-08	2,66E-08	0,976
58,5	3,68E-09*	4,34E-09	0,598
76,5	-3,34E-08*	5,04E-09	0,606
85,5	-2,37E-09*	4,50E-09	0,809

Пр и м е ч а н и е : \* – незначимый коэффициент.

Т а б л и ц а 3

**Коэффициенты уравнения регрессии яркости от верхней границы облачного слоя**

Коэффициент $b_0$	Коэффициент $b_1$	Коэффициент детерминации, $R^2$	Длина волны, мкм	Углы приема, град
5,23E-07	-3,3E-08	0,986	0,374	4,5
5,86E-07	-4,1E-08	0,980	0,53	
1,55E-07	-8,2E-09	0,959	0,374	13,5
1,61E-07	-9,6E-09	0,981	0,53	
5,94E-08	-2,4E-09	0,805	0,374	22,5
5,25E-08	-2,2E-09	0,732	0,53	

В целом, проведенный анализ показывает, что между полученными угловыми распределениями интенсивности и длиной волны, как для безоблачной, так и для облачной атмосферы, существует связь, которую можно с хорошей степенью точности описать гиперболическим уравнением регрессии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gendrina I.Yu. and Kvach A.S.* // The Monte Carlo method for determining the vision system characteristics // J. International Scientific Publication: Education Alternatives. – V. 11. – Part 1. ISSN 1313-2571. – Bulgaria. – P. 236–244.
2. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1997. – 402 с.
3. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике* / под ред. Г. И. Марчука. – Новосибирск: Наука, 1976. – 100 с.
4. *Гендрина И.Ю., Квач А.С., Алексеенко М.А.* Регрессионный анализ результатов имитационного моделирования переноса излучения в системах видения через атмосферу // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 8/2. – С. 294–296.
5. *Khayer M.M. et al.* Evaluation of a 5-year cloud and radiative property dataset derived from GOES-8 data over the Southern Great Plains // Twelfth ARM Science Team Meeting Proceedings. – St. Petersburg, Florida, April 8–12, 2002. – P. 1–14.

## О ВАРИАНТАХ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВОГНУТОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*А.А. Андрианова, А.А. Корепанова, И.Ф. Халилова*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

Задача вогнутого программирования имеет множество приложений в теории принятия решений и находит свое применение в различных сферах деятельности (медицина, техника, экономика). Основными методами решения этих задач сейчас являются методы, базирующиеся на идеях методов отсечения, сеточных методов и методов ветвей и границ, основанных на декомпозиции допустимого множества [1].

В данной статье исследуется подход, также основанный на применении схемы метода ветвей и границ. Его основное отличие от общеизвестных заключается в другой идее построения. В [2] показано, что оптимум задачи вогнутого программирования удовлетворяет тем же условиям, что и оптимум некоторой задачи выпуклого программирования, построенной с помощью данных исходной задачи. Таким образом, метод ветвей и границ используется для нахождения этой эквивалентной задачи выпуклого программирования. Этот подход исследовался теоретически в [3]. В [4] был предложен один из вариантов метода ветвей и границ этого типа для задачи вогнутого программирования частного вида.

Пусть в евклидовом пространстве  $R_n$  определены непрерывно дифференцируемые вогнутые функции  $f(\cdot), f_i(\cdot) \ i \in I, \ I = \{1, 2, \dots, m\}$ . Решается следующая задача вогнутого программирования:

$$\min \{f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D\}, \quad (1)$$

где  $D = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \in R_n, f_i(\mathbf{x}) \leq 0, i \in I\}$ .

Задача (1) может иметь несколько локальных минимумов, среди которых ищется глобальный. Необходимые условия локального минимума задачи (1) известны как принцип Лагранжа ([5], Теорема 2.3). Если точка  $\mathbf{x}^* \in D$  является точкой локального минимума задачи (1), существуют числа  $y_i^* \geq 0, \ i = 0, 1, \dots, m$ , такие, что справедливы следующие условия:

$$y_0^* f(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^m y_i^* f_i(\mathbf{x}^*) = 0; \quad (2)$$

$$y_i^* f_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Условия (2) и (3) можно записать в другом виде:

$$y_0^* f(\mathbf{x}^*) + \sum_{i \in I(\mathbf{x}^*)} y_i^* f_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad (4)$$

где  $I(\mathbf{x}^*) = \{i : i \in I, f_i(\mathbf{x}^*) = 0\}$  является множеством активных индексов в точке  $\mathbf{x}^*$ . Следует отметить, что из [5] известно, что значением  $y_0^*$  можно пренебречь при выполнении условий регулярности для задачи (1).

В [2] показано, что для задачи выпуклого программирования вида

$$\max \{f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D_h\}, \quad (5)$$

где  $D_h = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \in R_n, f_i(\mathbf{x}) \geq 0, i \in I_h\}$ ,  $I_h = I(\mathbf{x}^*)$ , необходимые и достаточные условия оптимума совпадут с условием (4). Таким образом, для решения задачи (1) достаточно подобрать состав множества  $I(\mathbf{x}^*)$  как некоторого подмножества множества индексов  $I$ . Для этого и предлагается использовать метод ветвей и границ.

В работе исследуются две схемы метода ветвей и границ для определения множества  $I(\mathbf{x}^*)$  – схема на основании добавления ограничений к множеству допустимых решений задачи вида (5) и схема на основании исключения ограничений из множества допустимых решений.

**Схема 1 на основании добавления ограничений к множеству допустимых решений.** Формируется множество индексов для задачи (5)  $I_h = \emptyset$ , определяется рекордное значение  $f_{\text{rec}} = +\infty$ . В каждом узле строящегося дерева решений производятся следующие действия:

1. Решается задача выпуклого программирования вида (5) для множества индексов  $I_h$ . Обозначим ее решение  $\mathbf{x}_h^*$ . Если выявлено, что множество допустимых решений задачи пусто, ветвление не производится и осуществляется возврат к родительскому узлу, находящемуся на уровень выше. Отметим, что в корневом узле дерева точка  $\mathbf{x}_h^*$  будет являться точкой абсолютного максимума функции  $f(\cdot)$  при условии ее существования.



2. Вычисляется нижняя оценка узла и всего его дочернего поддерева  $f_{\text{down}}$ .

3. Если  $f_{\text{down}} > f_{\text{rec}}$ , ветвление не производится и осуществляется возврат к родительскому узлу на уровень выше.

4. Если  $\mathbf{x}_h^* \in D$ , то точка  $\mathbf{x}_h^*$  удовлетворяет необходимым условиям оптимума задачи (1), т.е. может быть локальным минимумом задачи (1). Если  $f_{\text{rec}} > f(\mathbf{x}_h^*)$ , то  $f_{\text{rec}} = f(\mathbf{x}_h^*)$  и запоминаем точку  $\mathbf{x}_h^*$  как возможное решение задачи (1).

5. Производим ветвление. Выбираем индексы еще не включенных в множество допустимых решений ограничений  $J = \{i : i \in I, i \notin I_h\}$ . Для каждого индекса  $j \in J$  осуществляем построение дочернего узла при  $I_h = I_h \cup \{j\}$ . Таким образом, количество дочерних узлов при ветвлении будет равно мощности множества  $J$ .

**Схема 2 на основании исключения ограничений из множества допустимых решений.** Формируется множество индексов для задачи (5)  $I_h = I$ , определяется рекордное значение  $f_{\text{rec}} = +\infty$ . В каждом узле строящегося дерева решений производятся следующие действия:

1. Решается задача выпуклого программирования вида (5) для множества индексов  $I_h$ .

2. Если задача имеет решение (обозначим его  $\mathbf{x}_h^*$ ) и  $\mathbf{x}_h^* \in D$ , точка  $\mathbf{x}_h^*$  удовлетворяет необходимым условиям локального минимума задачи (1). Если  $f_{\text{rec}} > f(\mathbf{x}_h^*)$ , то  $f_{\text{rec}} = f(\mathbf{x}_h^*)$  и запоминаем точку  $\mathbf{x}_h^*$  как возможное решение задачи (1). Дальнейшее ветвление не производим, так как при исключении очередного ограничения максимум функции  $f(\cdot)$  будет увеличиваться. Таким образом, дочерние узлы имеют худшую оценку значения целевой функции задачи (1).

3. Если задача (5), построенная на шаге 1, имеет пустое допустимое множество или  $\mathbf{x}_h^* \notin D$ , производим ветвление. Для каждого индекса  $j \in I_h$  осуществляем построение дочернего узла при  $I_h = I_h \setminus \{j\}$ . Таким образом, количество дочерних узлов при ветвлении будет равно мощности множества  $I_h$ .

Отметим основные отличия схемы 1 от схемы 2.

1. Основным инструментом улучшения эффективности для схемы 1 (шаги 2, 3 схемы 1) является построение нижней оценки  $f_{\text{down}}$  для узла и его дочернего поддерева, однако эта задача в общем виде не представляется простой. Тем не менее для частного случая задачи (1) с допустимым множеством, определенном двусторонними ограничениями на переменные, в [4] предложен способ вычисления нижней оценки.

2. Большая часть задач вида (5), которые ставятся в узлах дерева решений для схемы 2, имеют пустое допустимое множество  $D_h$ . Таким образом, для их решения можно применять менее трудоемкие процедуры для определения факта пустоты множества, например, основанные на применении метода опорных векторов или в случае линейных ограничений использующие симплексный метод с искусственными переменными.

3. Обе схемы предполагают возможность неоднократного решения задачи вида (5) для одного и того же множества  $I_h$ , полученного на разных ветвях дерева решений. Это становится возможным за счет разных последовательностей добавления или исключения индексов ограничений. Эту проблему можно решить ведением списка решенных задач.

4. Порядок рассмотрения индексов при ветвлении в общем случае не является существенным, однако для частных видов задач можно дать практические рекомендации для выбора порядка добавления или исключения ограничений. Так, для схемы 1 применительно к задаче с допустимым множеством, определенным двусторонними ограничениями на переменные, хорошо зарекомендовал себя способ ветвления, основанный на анализе удаления граничных значений каждой из переменных от ее значений в точке абсолютного максимума функции  $f(\cdot)$ . При применении схемы 2 для задач с множеством допустимых решений, заданных в виде многогранного множества, использовались данные о соответствующих ограничениям искусственных переменных, оставшихся в базисе при решении вспомогательной задачи вида (5) симплексным методом.

5. Обе схемы не исключают использования параллельных реализаций.

Далее приведем некоторые результаты экспериментов, которые демонстрируют основные свойства предлагаемых схем метода ветвей и границ. Эксперимент проводился с помощью набора известных тестовых задач [6] и их модификаций. Эти задачи имеют вид минимизации

квадратичной вогнутой функции при ограничениях

$$D = \{x : x \in R_n, a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n\}.$$

В ходе экспериментов проводились замеры времени решения задачи, подсчитывалось количество решенных задач вида (5) в узлах до достижения решения, а также количество смен рекорда.

Так, например, в табл. 1 приведены среднее время решения и количество решенных задач в узлах для схемы 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента для схемы 1 метода ветвей и границ

Количество ограничений	Среднее время решения задачи (1), с		Среднее количество решенных задач вида (5) в узлах дерева решений	
	Последов. реализация схемы 1	Паралл. реализация схемы 1 (4 ядра)	Последов. реализация схемы 1	Паралл. реализация схемы 1 (4 ядра)
2	0,0005	0,0004	1	1
4	0,0006	0,0006	1,6	2,2
6	0,002	0,0014	2,2	4,2
8	0,002	0,0048	2,8	5,6
10	0,006	0,0502	3	9,8

Из приведенных результатов видно, что параллельная реализация не дает ожидаемого эффекта при решении задачи (1) по сравнению с последовательной реализацией, видимо, за счет накладных расходов на создание задач, которые направляются отдельным потокам. Об этом говорит и показатель решенных задач вида (5) в узлах дерева решений. Увеличение этого показателя в параллельном варианте говорит о рациональном выборе способа ветвления в последовательном варианте схемы 1.

В табл. 2 приведены показатели эксперимента по схеме 2 метода ветвей и границ.

Показатели среднего времени решения задач при последовательной и параллельной реализации схемы 2 метода ветвей и границ также не позволяют сделать вывод об эффективности использования параллельной версии, что говорит о рациональности выбранного варианта ветвления. Показатели среднего количества решенных задач вида (5) и среднего количества смен рекорда приведены для последовательной версии схемы 2.

Результаты эксперимента для схемы 2 метода ветвей и границ

Количество ограниченных $m$	Среднее время решения задачи (1), с		Среднее количество решенных задач вида (5) в узлах дерева решений	Среднее количество смен рекорда
	Последов. реализация схемы 2	Паралл. реализация схемы 2 (4 ядра)		
2	0,00048	0,00076	2	1,3
4	0,00162	0,00174	8	6,6
6	0,02052	0,02076	26	14,2
8	1,14148	1,14582	80	23,2
10	170,1717	169,0983	242	72,4

Сравнение результатов экспериментов по схеме 1 и схеме 2 показывают очевидное преимущество схемы 1. Превосходство по показателю среднего времени решения обусловлено заметным уменьшением количества решенных задач в узлах дерева решений и наличием инструмента нижней оценки узла и исходящего из него поддерева.

Тем не менее схема 2 также показывает свою работоспособность, особенно для задач более общего вида, так как вычисление нижней оценки для схемы 2 не требуется, а в более общем случае вычисление хорошей нижней оценки является нетривиальной задачей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стрекаловский А.С.* Современные методы решения невыпуклых задач оптимизации и оптимального управления // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Математика. – 2009. – Т. 2. – № 1. – С. 245–256.
2. *Konnov I.V.* Sign reversion approach to concave minimization problems // Optim Lett. – 2010. – No.4. – P. 491–500.
3. *Андрианова А.А., Коннов И.В.* Метод ветвей и границ для задачи вогнутого программирования // Материалы XVII Международной конференции «Проблемы теоретической кибернетики» (Казань, 16–20 июня 2014 г.). – Казань: Отечество, 2014. – С. 23–26.
4. *Andrianova A.A., Korepanova A.A., and Halilova I.F.* One algorithm for branch and bound method for solving concave optimization problem // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 158. – P. 012005 doi:10.1088/1757-899X/158/1/012005.
5. *Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В.* Курс методов оптимизации: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.
6. *Chinchuluun A., Pardalos P.M., and Enkhbat R.* Global minimization algorithms for concave quadratic programming problems // Optimization. – 2005. – No. 54. – P. 627–639.

# ЛИНЕАРИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

*В.Г. Букреев<sup>1</sup>, Е.Б. Шандарова<sup>1</sup>, В.М. Рулевский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup>*НИИ автоматики и электромеханики ТУСУРа, г. Томск, Россия*

Процедура синтеза систем управления сложными объектами с нелинейными непрерывными и дискретными элементами предполагает несколько направлений формирования исходных математических моделей [1, 2]. Одним из вариантов математического описания динамических объектов является использование переменных состояния, отражающих «физику» процессов и позволяющих применить методы современной теории управления для построения эффективных регуляторов в замкнутой системе. Определяющей тенденцией развития этого подхода для многомерного объекта большого порядка можно считать его описание в виде аппроксимирующих передаточных функций. Такой подход позволяет значительно уменьшить количество дифференциальных уравнений, используемых для синтеза регуляторов. Кроме того, создаются предпосылки выполнения алгоритмов управления в реальном времени на контроллерах с ограниченными вычислительными возможностями.

Предлагается следующий алгоритм создания упрощенной модели сложного объекта (рис. 1).

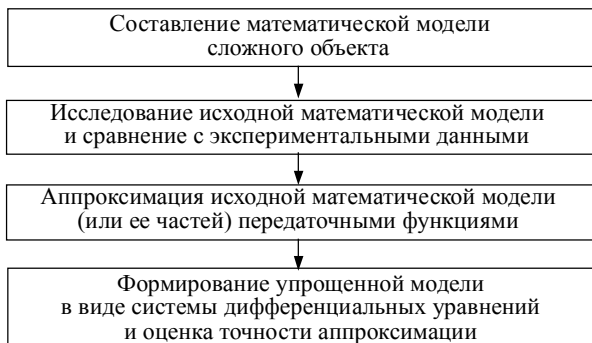


Рис. 1. Блок-схема алгоритма создания упрощенной модели

Если результаты, полученные при расчете упрощенной схемы, не превышают заданную погрешность, то аппроксимацию можно считать успешной. В противном случае – сложный объект управления разделяется на несколько частей, каждая из которых аппроксимируется своей передаточной функцией, имеющей меньший порядок, чем исходная модель.

Ярким примером сложного объекта являются системы электропитания (СЭП) глубоководных аппаратов с передачей энергии по кабелю на значительное расстояние [3].

Структура таких СЭП (рис. 2) включает источник электропитания с напряжением  $U_s$ , представляющий собой автономный синхронный генератор и выпрямитель, к выходу которого подключен Г-образный LC-фильтр (фильтр 1), автономный инвертор (И) с широтно-импульсной модуляцией, повышающий трехфазный трансформатор (ТН 1), кабельную линию (КЛ), понижающий трансформатор (ТН 2), два Г-образных LC-фильтра (фильтр 2, 3), а также активную нагрузку  $R$ . Для данной структуры СЭП была записана исходная математическая модель достаточно большого порядка [4].

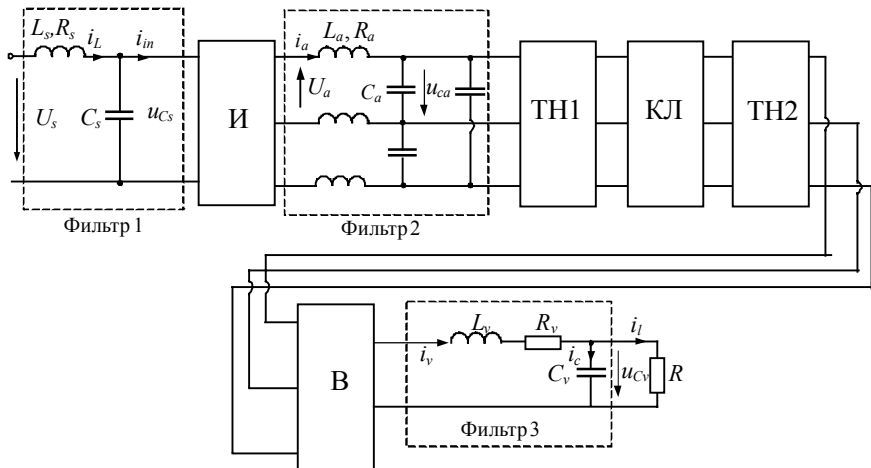


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения СЭП

Проведенные исследования СЭП показали, что большое количество дифференциальных уравнений, а также присутствие коммутационно-разрывных функций в системе дифференциальных уравнений усложняет задачу синтеза стабилизирующих регуляторов.

Задачей аппроксимации (при определенных условиях) для рассматриваемой системы является эквивалентная замена автономного инвертора, трансформаторов, кабельной линии и выпрямителя аппроксимирующей передаточной функцией.

В настоящее время существует несколько методов определения передаточной функции по экспериментальным характеристикам, которые отличаются один от другого способом представления информации, критериями приближения и особенностями расчета. При этом аппроксимирующая модель представляется в виде передаточной функции

$$W(p) = \frac{A(p)}{B(p)} e^{-\tau p},$$

где  $A(p), B(p)$  – полиномы;  $e^{-\tau p}$  – операторное изображение звена запаздывания с временем запаздывания  $\tau$ .

При выборе структуры и критериев приближения модели к рассматриваемому объекту нужно иметь в виду, что одному и тому же объекту может быть поставлено в соответствие множество различных по сложности моделей, каждая из которых будет передавать достаточную информацию о свойствах объекта.

Для оценки точности аппроксимации используется величина

$$\delta = \max \frac{|h(t_i) - h_a(t_i)|}{h(\infty)} 100 \%, \quad (1)$$

где  $h(t_i)$  и  $h_a(t_i)$  – значения соответственно экспериментальной и вычисленной по аппроксимирующей передаточной функции переходной характеристики;  $t_i$  – моменты времени. Если  $\delta < 3 - 5 \%$ , то точность аппроксимации считают удовлетворяющей требованиям расчетов.

В данной работе рассматривается аппроксимация переходной характеристики, полученной в результате моделирования СЭП. Используется переходная характеристика  $h_u(t)$ , которая представляет собой нормированную кривую разгона напряжения  $u_{C_v}(t)$  на конденсаторе  $C_v$  (рис. 2). Результатом решения задачи являлось получение аппроксимирующей передаточной функции, удовлетворяющей следующим условиям: порядок не выше 4; отсутствие полюсов; погрешность аппроксимации  $\delta \leq 5 \%$ .

Переходная характеристика данного объекта управления имеет S-образную форму с крутым фронтом, что затрудняет процесс ее ап-

проксимации уравнениями низкого порядка. Для получения передаточной функции были использованы как графические, так численные методы расчета. Распространенными графическими методами являются метод номограмм и метод Шварца.

Так, при расчете методом номограмм аппроксимирующая передаточная функция ищется в виде

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^n}.$$

Для вычисления постоянных времени в точке перегиба, где переходная характеристика имеет максимальный наклон, проводится касательная и определяется длина отрезка  $T_0$ , заключенного между точками пересечения этой касательной с осью абсцисс и линией установившегося значения характеристики  $h_{уст}$ . Положение точки перегиба не всегда удается выбрать с достаточной точностью, но это не считается недостатком метода, а свидетельствует о том, что близким переходным характеристикам могут соответствовать сильно различающиеся по структуре передаточные функции.

После нахождения точки перегиба по номограммам выбирается порядок  $n$  и определяются постоянные времени  $T_1$ ,  $T_2$  [5].

Метод Шварца также основан на графическом определении постоянной времени и времени запаздывания и позволяет без применения автоматизированного расчета получить передаточную функцию моделируемого объекта в виде  $n$  одинаковых последовательно соединенных аperiodических звеньев:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(Tp + 1)^n}.$$

Исследования показали, что удовлетворительную точность аппроксимации можно получить при  $n = 4$ . Результаты моделирования для реальных параметров СЭП приведены в таблице.

В основе метода площадей Симою лежит предположение, что объект описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, а его нормированная переходная характеристика может быть аппроксимирована передаточной функцией вида [6]

$$W(p) = \frac{(1 + b_1 p + \dots + b_m p^m) e^{-\tau p}}{(1 + a_1 p + \dots + a_n p^n)}. \quad (2)$$



Метод номограмм		
$n = 2$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,0055p + 1)(0,0024p + 1)}$	$\delta = 13,3 \%$
$n = 3$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,0056p + 1)(0,0017p + 1)^2}$	$\delta = 9,9 \%$
$n = 4$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,0026p + 1)(0,0024p + 1)^3}$	$\delta = 4,9 \%$
Метод Шварца		
$n = 4$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,0022p + 1)^4}$	$\delta = 4,7 \%$
Метод площадей		
$n = 3$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0025p}}{9,6 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 3,8 \cdot 10^{-5} p^2 + 9,72 \cdot 10^{-3} p + 1}$	$\delta = 4 \%$
Метод наименьших квадратов		
$n = 2$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,00491p + 1)(0,0036p + 1)}$	$\delta = 9 \%$
$n = 3$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,00299p + 1)^3}$	$\delta = 6 \%$
$n = 4$	$W(p) = \frac{1e^{-0,0016p}}{(0,002456p + 1)^4}$	$\delta = 5 \%$

Практика расчетов показывает, что степень полинома знаменателя не следует брать более трех. Для нахождения явного вида выражения (2) были определены значения коэффициентов  $a_1, a_2, a_3$  (таблица).

В случае применения метода наименьших квадратов (МНК) процесс аппроксимации включает определение вида функции, по форме максимально отражающей характер расположения экспериментальных точек, выбор которой определяется из анализа экспериментальной характеристики (начальное и конечное значение, характер изменения во времени и т.д.). Путем минимизации критерия качества, с использованием одного из методов поиска, находятся коэффициенты, содержащиеся в аналитическом описании функции. В качестве такого критерия может быть выбрана сумма квадратов отклонений аппроксимирующего выражения от значений переходной характеристики.

Основной трудностью данного метода является выбор переходной характеристики, а также подбор начальных условий, что не всегда является очевидным. Кроме того, все численные методы решения систем нелинейных уравнений сильно зависят от начального приближения.

В рассматриваемом случае МНК существенно не повышает точность аппроксимации (таблица), так как качество получаемых в результате поиска решений сильно зависит от характера линий уровня, которые для данной задачи имеют вид сильно вытянутого оврага.

В результате проведенных исследований было установлено, что удовлетворительную точность аппроксимации исходной математической модели СЭП можно получить, используя метод площадей или МНК для третьего порядка аппроксимирующей функции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Халил Х.К.* Нелинейные системы. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009. – 832 с.
2. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд. испр. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.
3. *Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., et al.* Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177 (1). – Art. no. 012073.
4. *Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., et al.* The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177 (1). – Art. no. 012098.
5. *Ротац В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
6. *Рутковский А.Л., Матвеева Л.И., Козачек Г.В.* Оптимизация коэффициентов передаточной функции, полученной модифицированным методом Симою по экспериментально снятой переходной характеристике. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2010. – Т. 6. – № 3. – С. 138–141.

# **АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ СТОИМОСТИ КВАРТИР г. ТОМСКА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА БАЗЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

***Т.В. Бушкова***

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рынок недвижимости и всех его участников можно считать экономической системой, которая в жизни современного общества занимает важное место. Развитие рынка жилья в нашем городе, как и в целом в России, повышение деловой активности его субъектов диктуют необходимость осуществления рыночной оценки стоимости жилых объектов. Оценка стоимости жилья необходима при осуществлении различных сделок с недвижимостью (купля – продажа, ипотека, залог и т.д.), а также для целей аналитических исследований рынка жилой недвижимости. Сегодня эксперты рынка недвижимости проявляют повышенный интерес к методам массовой оценки рыночной стоимости объектов жилой недвижимости, это может быть связано с изменением порядка начисления налога на имущество. До 2016 г. при расчете данного налога в отношении жилья в качестве базы налогообложения выступала инвентаризационная стоимость формируемая Бюро технической инвентаризации, которая значительно отличается от текущей рыночной цены. В настоящее время осуществляется переход к новой методике расчета налогооблагаемой базы – исходя из рыночной стоимости объекта (в соотв. с Письмом МИНФИНа РФ N 03-05-06-02/41 от 17 июня 2008 г., Проектом Федерального закона N 51763-4 «О внесении изменений в часть вторую Налогового кодекса Российской Федерации и некоторые другие законодательные акты Российской Федерации»). Данные изменения вызвали необходимость массовой переоценки стоимости жилья по всей стране. Традиционные методы оценки оказались затратными и трудоемкими, не пригодными для того, чтобы оперативно справиться с большими объемами работы.

Регрессионный анализ можно рассматривать в качестве эффективного и удобного метода, основанного на анализе большого количества фактических данных, для оценки рынка жилья, как массовой, так и индивидуальной, а также для определения основных тенденций и законо-

мерностей при формировании рыночной цены объектов жилья в рамках различных аналитических исследований.

В настоящей работе методами регрессионного анализа проводится исследование зависимости стоимости квартир города Томска от различных качественных и количественных характеристик. Было исследовано 300 квартир, выставленных на продажу в агентствах недвижимости Томска. Данные взяты с сайтов трех самых крупных агентств недвижимости Томска по состоянию на декабрь 2015 г.

Специфика рынка недвижимости Томска определяется рядом моментов. Томск – город на востоке Западной Сибири на берегу реки Томь, административный центр одноименной области и района (площадь 294,6 км<sup>2</sup>, население около 500 000 человек, 200 тыс. квартир общей площадью примерно в 10 млн кв. м). Общий износ жилых помещений в Томске составляет 60 %. При этом площадь муниципального ветхого и аварийного жилищного фонда увеличивается на 4–6 тыс. кв. м в год и достигает сейчас 360 тыс. кв. м. Рынок жилой недвижимости Томска географически структурирован.

Наиболее престижный и дорогой район – Кировский. Жилье на его улицах (например, Елизаровых и Кирова) стоит дороже всего. В бесспорных преимуществах данного района – близость автомобильного и железнодорожного вокзалов, университетов, торговых и развлекательных центров. Значительное количество квартир в районе сдается в аренду студентам, имеющим состоятельных родителей. По подсчетам местных властей жилье у частных арендуют от 10 до 15 тыс. студентов. Большая часть из них селится именно в Кировском районе. На втором месте по уровню цен и комфорта значится Советский район. В его состав входит уникальная «Татарская слобода», являющаяся прекрасным образцом старинной деревянной архитектуры. В данном районе города много туристов, в том числе и иностранных. Это положительно влияет на местный рынок арендного жилья и торговой недвижимости.

Ленинский район считается одним из наиболее криминальных в городе. На его территории сосредоточено большое количество промышленных предприятий и товарная станция. Помимо этого, данный район знаменит частыми проблемами в коммунальной сфере. Автомобильные пробки на улице Ленина, связующей район с остальным городом, существенно снижают транспортную доступность микрорайонов и сокращают стоимость жилья в них. Октябрьский район является наиболее дешевым, но в то же время и самым перспективным в городе. После

решения дорожных проблем в районе томской «кольцевой» на 4-й поликлинике транспортная доступность спального района возросла, что существенно повысило стоимость жилья. Не случайно ряд застройщиков подобных ТДСК, ТПСК возводят большую часть своих новостроек именно здесь. Это создает еще одну отличительную черту района – большое количество новых и современных домов.

Построим математическую модель стоимости квартир, зависящую от следующих рыночных характеристик: общей площади, жилой площади, площади кухни, этажа, материала (типа) дома, состояния помещения, количества комнат.

Рассмотрим применение метода наименьших квадратов для определения неизвестных параметров уравнения, описанного с помощью полинома второго порядка:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_1^2 + \beta_3x_2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $Y$  – экзогенная переменная (стоимость квартиры);  $\beta_i$  – коэффициент при  $i$ -й эндогенной переменной; величины  $\varepsilon$  – отклонения, которые не объясняются моделью, а вызваны другими факторами. Независимые переменные:  $x_1$  – общая площадь в метрах квадратных;  $x_2$  – площадь кухни в метрах квадратных.

Как и в случае с моделью, построенной на основе функции Кобба — Дугласа, полином любого порядка необходимо свести к линейной регрессии с ее методами оценивания параметров и проверки гипотез. Показатели адекватности модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели адекватности полиномиальной модели**

Статистики	Значение
Множест. R	0,951
Множест. R2	0,904
Скоррект. R2	0,902
F(4,244)	457,195
p	0
Стд. ош. оценки	392,977
$\Delta$	0,0042

Исходя из критериев качества, можно сделать вывод, что модель в общем можно считать статистически значимой.

Проанализировав результаты проведенного регрессионного анализа, приходим к выводу, что модель адекватная и может быть записана следующим образом:

$$Y = 214,18 + 82,52x_1 - 78,74x_2 + 5,96x_1^2 - 19,99x_2^2 + 16,78x_1x_2. \quad (2)$$

Выполнив графический тест на нормальность остатков регрессии и тест по критерию Шапиро – Уилка, делаем вывод о том, что распределение остатков приближается к нормальному. Поэтому на основании t-критерия исключаем незначимые факторы из модели.

Исключив из модели незначимые переменные согласно t-критерию, получаем

$$Y = \beta_1x_1 + \beta_3x_2 + \beta_5x_1x_2. \quad (3)$$

Т а б л и ц а 2

Показатели адекватности модели (3)

Статистики	Значение
Множест. R	0,930
Множест. R2	0,864
Скоррект. R2	0,862
F(4,244)	520,739
p	0
Стд. Ош. Оценки	464,665
$\Delta$	0,048

С помощью коэффициентов, полученных методом наименьших квадратов, модель может быть записана следующим образом:

$$Y = 522,764 + 18,83x_1 + 0,09x_1^2 + 0,54x_1x_2. \quad (4)$$

Показатели модели незначительно ухудшились. Применив t-критерий, удаляем из модели  $x_1^2$  и получаем модель

$$Y = 567,76 + 18,83x_1 + 0,43x_1x_2. \quad (5)$$

Показатели адекватности модели (5) представлены в табл. 3.

Отметим, что полиномиальная модель первого вида (2) оказалась более эффективной. Прогноз, построенный на основе этой модели, является более точным, и рассчитанный процент отклонения прогнозируемых результатов от наблюдаемых значений меньше, чем для второй модели. Однако показатели ухудшились незначительно, это говорит о том, что модель (5) тоже можно применять на практике.

Т а б л и ц а 3

## Показатели адекватности модели (5)

Статистики	Значение
Множест. R	0,930
Множест. R <sup>2</sup>	0,864
Скоррект. R <sup>2</sup>	0,863
F(4,244)	782,544
p	0
Стд. Ош. Оценки	464,460
$\Delta$	0,049

В работе показано, что введение в модель фиктивной переменной «район города, в котором находится объект» привел к улучшению качества модели по сравнению с моделью (5). Это говорит о том, что модели, в которые входят как количественные признаки экзогенной переменной, так и качественные, наиболее полно отражают зависимость, и прогнозы на их основе оказываются более точными и более пригодными для практических целей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Магнус Я.Р., Катыйшев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: учебник. – М.: Дело, 2004. – 580 с.
2. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики: учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ, 1998 – 233 с.
3. Доугерти К. Введение в эконометрику: пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 402 с.
4. Афанасьев В.Н., Цыпин А.П. Эконометрика в пакете STATISTICA: учебное пособие по выполнению лабораторных работ. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 204 с.
5. Мхитарян В.С. Эконометрика: учебник – М.: Проспект, 2008. – С. 121–127.
6. Терпугов А.Ф. Экономико-математические модели: учеб. пособие. – Томск: ТГПУ, 1999. – 118 с.
7. Бушкова Т.В., Кошкин Г.М. Анализ зависимости стоимости квартир города Томска от различных факторов // Сборник материалов XXI Всероссийской научно – практической конференции «Научное творчество молодежи. Математика. Информатика». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – Ч. 1. – С. 52–57.
8. Бушкова Т.В., Кошкин Г.М. Исследование регрессионных моделей зависимости стоимости квартир г. Томска от различных факторов // Материалы XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – Ч. 2. – С. 8–13.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ФОНДОВОГО РЫНКА

*Г.З. Вахитов, З.А. Еникеева*

*Институт вычислительной математики  
и информационных технологий КФУ, г. Казань, Россия*

Одной из составляющей задачи прогнозирования динамики фондового рынка является технический анализ.

Рассмотрим задачу построения динамических распределений вероятностей количества периодов повышения или понижения значений временного ряда. Для этого создадим алгоритм построения каналов для распознавания однонаправленного изменения значений.

Пусть зафиксированы некоторые моменты времени:  $t_0, t_1, \dots, t_N$ . Обозначим через  $y(t)$  временной ряд, значения которого известны в указанные моменты времени.

Для каждого  $t_i, 1 \leq i \leq N$  методом наименьших квадратов построим семейство прямых  $\{a_j^{(i)} \cdot t + b_j^{(i)}\}_{i < j \leq N}$ , где

$$a_j^{(i)} = \frac{(j-i+1) \sum_{k=i}^j y(t_k) t_k - \sum_{k=i}^j t_k \sum_{k=i}^j y(t_k)}{(j-i+1) \sum_{k=i}^j t_k^2 - \left( \sum_{k=i}^j t_k \right)^2},$$

$$b_j^{(i)} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j y(t_k) - a_j^{(i)} \frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j t_k.$$

Если целесообразно моменты времени сопоставить элементам натурального ряда, то есть перенумеровать, то тогда искомые коэффициенты уравнений вычисляются по формулам

$$a_j^{(i)} = \frac{12(j-i+1) \sum_{k=i}^j k y(t_k) - 6(j+i)(j-i+1) \sum_{k=i}^j y(t_k)}{(j-i+1)(2j(j+1)(2j+1) - 2(i-1)(2i-1)i - 3(j+1)(j-i+1))},$$



$$b_j^{(i)} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j y(t_k) - a_j^{(i)} \frac{i+j}{2}.$$

Для каждой точки  $t_i$  вычислим числовую характеристику

$$M_i = \frac{1}{N-i} \sum_{j=i+1}^N \frac{\sum_{k=i}^j (y(t_k) - a_j^{(i)} t_k - b_j^{(i)})^2}{j-i+1}.$$

Вычислим  $L = \min_{0 \leq i \leq N} M_i$ .

Выберем номер  $i$ , которому соответствует величина  $L$ . Точку  $t_i$  сделаем началом некоторого тренда. Количество точек в этом тренде определим следующим образом. Вычислим величину

$$S_i = \min_{i+1 \leq j \leq N} \frac{\sum_{k=i}^j (y(t_k) - a_j^{(i)} t_k - b_j^{(i)})^2}{j-i+1}.$$

В данный тренд войдут точки, при помощи которых строилось уравнение, соответствующее величине  $S_i$ .

Исключим из рассмотрения  $t_i$  и точки, вошедшие в тренд, началом которого служит точка  $t_i$ , и для оставшихся точек повторим процедуру.

Таким образом, за конечное число шагов обозначим это число через  $h$ , получим ломаную, звенья которой определяют направления изменения значений временного ряда.

Построим каналы, внутри которых будут лежать все рассматриваемые точки. Ширину канала рассчитаем по формуле

$$d = \max_{1 \leq i \leq N} |y(t_i) - a^{(k)} t_i - b^{(k)}|,$$

где  $a^{(k)}$  и  $b^{(k)}$  ( $1 \leq k \leq h$ ) – параметры звена ломаной, соответствующего промежутку, которому принадлежит точка  $t_i$ .

Тогда уравнения верхних и нижних границ каналов соответственно будут иметь вид

$$y = a^{(k)} t + b^{(k)} + \frac{d}{a^{(k)}} \sqrt{1 + a^{(k)}} \quad \text{и} \quad y = a^{(k)} t + b^{(k)} - \frac{d}{a^{(k)}} \sqrt{1 + a^{(k)}}.$$

Заметим, что ширина каналов здесь рассчитана так, чтобы все точки принадлежали каналу. Однако вполне допустимо, что некоторое небольшое число точек может оказаться за границами канала. Поэтому ширина – величина моделируемая.

Итак, имеем  $h$  каналов, среди которых есть каналы с возрастающим трендом, если  $a^{(k)} > 0$ , с убывающим трендом, если  $a^{(k)} < 0$ , с боковым трендом, если  $a^{(k)} \approx 0$ . Обозначим через  $f_k$  количество каналов с возрастающим трендом в течение  $k$  дней.

Рассмотрим некоторый момент времени  $t$ . Будем предполагать, что к этому моменту по точкам, количество которых равно  $N(t)$ , построено  $h_1(t)$  каналов с возрастающим трендом, точка  $t$  также принадлежит возрастающему тренду и является  $i$ -м моментом возрастания.

Тогда вероятность того, что тренд будет оставаться в возрастающем тренде ещё  $l$  моментов времени, можно оценить формулой

$$P(t) = \frac{l \sum_{j=l+i}^{h_1(t)} f_j(t)}{N(t)}.$$

Данный метод построения каналов использует уже известные статистические данные, но не отвечает на вопрос, будет ли являться вновь зарегистрированная точка временного ряда точкой разворота тренда. Эта задача относится к трудно формализуемым задачам. Для её решения используется динамическая модель байесовской нейронной сети, на вход которой подаются координаты точек разворота тренда и тангенсы углов между звеньями ломанных, ограничивающих каналы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bartunov S., Vetrov D., Kondrashkin D., and Osokin A.* Breaking Sticks and Ambiguities with Adaptive Skip-gram // *J. Machine Learning Research.* – 2016. – V. 51. – P. 130–138.
2. *Struminsky K., Kruglik S., Vetrov D., and Oseledets I.* A new approach for sparse Bayesian channel estimation in SCMA uplink systems // *2016 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2016.* October 13 – 15, Yangzhou, China. – N.Y.: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2016.
3. *Ned Gandevani.* Winning Edge Trading. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

# ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

*А.В. Войтишек*

*Институт вычислительной математики и математической  
геофизики СО РАН, Новосибирский государственный университет,  
г. Новосибирск, Россия*

## 1. Функциональные алгоритмы решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода

В данной работе рассматривается задача приближения решения  $\varphi(x)$  интегрального уравнения Фредгольма второго рода

$$\varphi(x) = \int_X k(x', x)\varphi(x')dx' + f(x) \quad \text{или} \quad \varphi = K\varphi + f \quad (1.1)$$

на компактном множестве  $X \subseteq \mathbb{R}^d$ . Здесь функции  $k(x', x)$  (ядро интегрального оператора  $K$ ) и  $f(x)$  (свободный член уравнения) заданы.

Особенностью задачи приближения функции  $\varphi(x)$  является то обстоятельство, что функция задана в неявной (интегральной) форме. Это означает невозможность явного (с использованием композиций элементарных функций) вычисления как самой функции  $\varphi(x)$  в фиксированном наборе точек

$$\mathbf{X}^{(M)} = \{x_1, \dots, x_M\} \quad (1.2)$$

(например, на аппроксимационной сетке):

$$\boldsymbol{\varphi}^{(M)} = \{\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_M)\}, \quad (1.3)$$

так и функционалов вида

$$\mathbf{F}^{(M)} = \{(\varphi, \chi_1), \dots, (\varphi, \chi_M)\}, \quad (\varphi, \chi_i) \stackrel{\text{def}}{=} \int_X \varphi(y)\chi_i(y)s(y)dy \quad (1.4)$$

для заданного набора «базисных» функций

$$\Xi^{(M)} = \{\chi_1(x), \dots, \chi_M(x)\}, \quad (1.5)$$

весовой функции  $s(y)$  и достаточно большого  $M$ .

Поэтому при построении алгоритмов аппроксимации функции  $\varphi(x)$  (будем называть их **функциональными алгоритмами**) предполагается численное приближение величин (1.3) и (или) (1.4). Особо будут выделены *рандомизированные* функциональные алгоритмы, в которых величины (1.3) и (1.4) приближаются методом Монте-Карло [1].

Для приближения функции  $\varphi(x)$  используем представления классической теории численной аппроксимации функций [2], имеющих общий вид

$$\varphi(x) \approx L_M \varphi(x) = \sum_{i=1}^M w_i \chi_i(x) \quad (1.6)$$

для некоторого специально выбранного набора «базисных» функций (1.5) (вид этих функций определяет тип аппроксимации (6)) и коэффициентов

$$\mathbf{W}^{(M)} = \{w_1, \dots, w_M\}. \quad (1.7)$$

Выделим два типа функциональных алгоритмов, связанных с представлением (1.6): **проекционные** и **сеточные численные методы**.

Для *проекционных функциональных алгоритмов* базисные функции (1.5) из аппроксимации (1.6) представляют собой отрезок ряда (длины  $M$ ) ортогональных (с весом  $s(y)$ ) функций (как правило, многочленов), для которых

$$(\chi_i, \chi_j) = \int_X \chi_i(y) \chi_j(y) s(y) dy = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, M.$$

Здесь коэффициенты (1.7) равны величинам (1.4):

$$w_i = (\varphi, \chi_i). \quad (1.8)$$

Для *сеточных функциональных алгоритмов* коэффициенты (1.7) представляют собой некоторые комбинации значений (1.3) в точках достаточно регулярной сетки (1.2):

$$w_i = w_i(\boldsymbol{\Phi}^{(M)}); \quad (1.9)$$

чаще всего

$$w_i = \varphi(x_i). \quad (1.10)$$

Далее строятся (различными способами) приближения

$$\tilde{\mathbf{W}}^{(M)} = \{\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_M\} \quad (1.11)$$

величин (1.8) – (1.10), и окончательная аппроксимация имеет вид

$$\varphi(x) \approx L_M \tilde{\varphi}(x) = \sum_{i=1}^M \tilde{w}_i \chi_i(x). \quad (1.12)$$

При исследовании и оптимизации аппроксимационного функционального алгоритма (1.12) важным и содержательным оказывается координированный учет погрешностей, связанных с использованием приближения (1.6) и с получением неточных значений (1.11) (см., в частности, [1, 3], а также разд. 4 данной работы).

## 2. Вероятностный смысл интегрального уравнения Фредгольма второго рода

Вероятностный смысл уравнения (1.1) проявляется в достаточно распространенном на практике случае, когда свободный член  $f(x)$  имеет свойства вероятностной плотности:

$$f(x) \geq 0 \quad \text{и} \quad \int_X f(x) dx = 1, \quad (2.1)$$

а ядро  $k(x', x)$  имеет вид

$$k(x', x) = (1 - p_a(x'))r(x', x), \quad (2.2)$$

где функция  $r(x', x) = r(x' \rightarrow x) = r_{\xi}(x | \eta = x')$  является условной плотностью вероятностей [4], а значения функции  $p_a(x')$  заключены между нулем и единицей.

В этом случае можно рассмотреть *прикладную цепь Маркова* или *однородную цепь Маркова, обрывающуюся с вероятностью единица* (подробнее см. [1, 3]):

$$\tilde{\xi}^{(0)}, \tilde{\xi}^{(1)}, \dots, \tilde{\xi}^{(T-1)}, \tilde{\xi}^{(T)} \quad (2.3)$$

с начальной плотностью  $f(x)$  и переходной функцией (2.2). Здесь  $p_a(x')$  – вероятность обрыва цепи в точке  $x'$  (при этом  $T$  – это случайный номер состояния обрыва), а

$$r(x', x) = r(\tilde{\xi}^{(t-1)} \rightarrow \tilde{\xi}^{(t)}) = r_{\tilde{\xi}^{(t)}}(x | \tilde{\xi}^{(t-1)} = x')$$

– плотность перехода (одинаковая для всех  $t = 1, \dots, T$ ).

Тогда, согласно аналогу формулы полной плотности вероятности для обрывающейся цепи (2.3) [4], имеем

$$\varphi^{(t)}(x) = \int_X \varphi^{(t-1)}(x') k(x', x) dx' = K \varphi^{(t-1)}(x), \quad \varphi^{(0)}(x) = f(x).$$

Здесь  $\varphi^{(t)}(x)$  – плотность распределения случайной величины  $\tilde{\xi}^{(t)}$  и  $t = 1, \dots, T$ .

Методом математической индукции получаем, что  $\varphi^{(t)}(x) = K^t f(x)$  и что полная (суммарная) плотность состояний цепи (2.3)

$$\varphi(x) = \varphi^{(0)}(x) + \varphi^{(1)}(x) + \dots + \varphi^{(t)}(x) + \dots \quad (2.4)$$

представляет собой ряд Неймана [1] и потому (в условиях сходимости этого ряда, например, при

$$1 - p_a(x') \leq q < 1 \quad (2.5)$$

для всех  $x' \in X$ ) является единственным решением интегрального уравнения (1.1) [5].

Таким образом, полная (суммарная) плотность состояний (2.4) прикладной цепи Маркова (2.3) с начальной плотностью (2.1) и переходной функцией (2.2) при выполнении условий типа (2.5) является единственным решением интегрального уравнения Фредгольма второго рода (1.1). Такое уравнение целесообразно называть **марковским**.

Приведенные здесь фрагменты теории марковских интегральных уравнений помогают в обосновании **основного весового оценителя** (монте-карловской оценки) или **оценителя по столкновениям**

$$\zeta = \sum_{t=0}^T Q^{(t)} h(\tilde{\xi}^{(t)}) \quad (2.6)$$

для приближенного вычисления линейного функционала вида

$$I_h = \int_X \varphi(x) h(x) dx \stackrel{\text{def}}{=} (\varphi, h) = \mathbf{E} \zeta \quad (2.7)$$

(для заданной функции  $h(x)$ ) от решения  $\varphi(x)$  уравнения (1.1) (здесь

рассматривается произвольный случай, для которого условия (2.1), (2.2) могут не выполняться [1, 3]. В формуле (2.6)

$$\xi^{(0)}, \xi^{(1)}, \dots, \xi^{(T-1)}, \xi^{(T)} \quad (2.8)$$

– прикладная цепь Маркова с начальной плотностью распределения  $\pi(x)$  (это плотность распределения случайной величины  $\xi^{(0)}$ ) и переходной функцией

$$p(x', x) = p_{\xi^{(t)}}(x | \xi^{(t-1)} = x') = (1 - p_a(x'))r(x', x) \quad (2.9)$$

(здесь  $p_a(x')$ , как и выше, – вероятность обрыва цепи в точке  $x'$ ,  $r(x', x)$  – вероятностная переходная плотность, а  $T$  – случайный номер состояния обрыва). Случайные веса  $Q^{(t)}$  из соотношения (2.6) определяются рекуррентно по формулам

$$Q^{(0)} = \frac{f(\xi^{(0)})}{\pi(\xi^{(0)})}, \quad Q^{(t)} = Q^{(t-1)} \frac{k(\xi^{(t-1)}, \xi^{(t)})}{p(\xi^{(t-1)}, \xi^{(t)})}. \quad (2.10)$$

Из соотношений (2.6) и (2.7) следует, что, реализуя на ЭВМ траектории прикладной цепи Маркова (2.8) с начальной плотностью  $\pi(x)$  и переходной функцией (2.9), можно приближать функционал  $I_h$  из соотношения (2.7) методом Монте-Карло

$$I_h = \mathbf{E}\zeta \approx \frac{\zeta_1 + \dots + \zeta_N}{N}$$

(см., например, [1, 3]), вычисляя соответствующие значения  $\zeta_1, \dots, \zeta_N$  по формулам (2.6) и (2.10).

### 3. Рандомизированные проекционные и сеточные функциональные алгоритмы

На основе рассуждений предыдущего раздела можно построить следующий **рандомизированный проекционный функциональный алгоритм**.

АЛГОРИТМ 1. *Реализуя  $N$  траекторий*

$$\xi_n^{(0)}, \xi_n^{(1)}, \dots, \xi_n^{(T_n-1)}, \xi_n^{(T_n)}; \quad n = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

прикладной цепи Маркова (2.8), вычисляем значения

$$\tilde{w}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^{T_n} Q_n^{(t)} \chi_i(\xi_n^{(t)}) s(\xi_n^{(t)}), \quad i=1, \dots, M \quad (3.2)$$

(здесь веса  $Q_n^{(t)}$  вычисляются по формулам (2.10)), а затем используем приближение (1.12).

Идея Алгоритма 1 была впервые предложена более полувека назад в работе [6], но более или менее интенсивное применение (во всяком случае, в российской науке) эта идея нашла лишь в последнее время [7].

Гораздо более подробно исследованы рандомизированные сеточные функциональные алгоритмы, связанные с применением основного оценителя (2.6) (см., в первую очередь, [1, 3]).

В качестве примера приведем **метод зависимых испытаний** (или **функциональную локальную оценку**), идея которого была впервые предложена все в той же работе [6].

АЛГОРИТМ 2. Реализуя  $N$  траекторий (3.1) прикладной цепи Маркова (2.8), вычисляем значения

$$\tilde{\Phi}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^{T_n} Q_n^{(t)} k(\xi_n^{(t)}, x_i) + f(x_i); \quad i=1, \dots, M \quad (3.3)$$

и вычисляем коэффициенты (1.11) по формулам

$$\tilde{w}_i = w_i(\tilde{\Phi}^{(M)}) \quad \text{или} \quad \tilde{w}_i = \tilde{\Phi}_i, \quad \text{где} \quad \tilde{\Phi}^{(M)} = (\tilde{\Phi}_1, \dots, \tilde{\Phi}_M), \quad (3.4)$$

а затем используем приближение (1.12).

Идея построения приближений (3.3) решения уравнения (1.1) в узлах сетки (1.2) состоит в том, что первое слагаемое в правой части интегрального уравнения (1.1) имеет вид функционала (2.7):

$$\int_X k(x', x) \varphi(x') dx' = I_{h_x} = (\varphi, h_x); \quad h_x(x') = k(x', x).$$

Метод зависимых испытаний, обладая рядом несомненных преимуществ (простота построения, экономичность, сохранение гладкости решения для приближения (1.12), независимость погрешности от числа узлов сетки (1.2)), используется относительно редко, так как требует повышенной гладкости ядра  $k(x', x)$  и свободного члена  $f(x)$  уравнения (1.1) по переменной  $x$  [1, 3, 6].



#### 4. Условная оптимизация рандомизированных функциональных алгоритмов

Проведенное подробное исследование показало, что для многих практически важных задач применение сеточных методов (типа Алгоритма 2 и др.) затруднено из-за невозможности вычисления ядер и свободных членов исследуемых интегральных уравнений вида (1.1) во всех точках множества  $X$ .

В этом смысле весьма привлекательным видится использование в этих задачах проекционных алгоритмов (типа Алгоритма 1), подобно тому, как это сделано в работе [7]. Однако, в отличие от сеточных методов, для этих алгоритмов несколько затруднено применение *теории условной оптимизации* [1, 3].

В этой теории речь идет о согласованном выборе параметров  $M$  (число узлов и базисных функций) и  $N$  (число реализуемых на компьютере траекторий прикладной цепи Маркова) используемых функциональных алгоритмов, обеспечивающем заданный уровень погрешности (обозначим его  $\gamma$ ) при минимальных вычислительных затратах  $S$ .

Строится верхняя граница  $UP(M, N)$  погрешности алгоритма  $\delta(M, N)$ , зависящая от параметров  $M$  и  $N$ :

$$\delta(M, N) \lesssim UP(M, N). \quad (4.1)$$

Эта функция двух переменных приравнивается величине  $\gamma$ . Из уравнения вида

$$UP(M, N) = \gamma \quad (4.2)$$

один из параметров (например,  $N$ ) выражается через другой:

$$N = \psi(M).$$

Это соотношение подставляется в выражение для затрат  $S(M, N)$  (которое тоже зависит от параметров  $M$  и  $N$ ). В результате получается функция  $\tilde{S}(M)$  одного переменного  $M$ , которая исследуется на минимум с помощью известных приемов математического или численного анализа.

Найденные значения  $M_{\min}(\gamma)$ ,  $N = \psi(M_{\min}(\gamma))$  объявляются *условно-оптимальными параметрами* модели (алгоритма). «Условность» такого способа оптимизации связана с тем, что в левой части уравнения вида

(4.2) используется не сама погрешность алгоритма  $\delta(M, N)$ , а ее верхняя граница  $UP(M, N)$  (а вдруг эта граница неточная, грубая?!).

Проблемы проведения таких рассуждений для проекционных методов связаны наличием «хвостов»  $\{\chi_{M+1}(x), \chi_{M+2}(x), \dots\}$  бесконечных ортогональных систем функций и необходимостью их оценки для построения верхних границ погрешности вида (4.1).

В этом смысле гораздо проще (и, возможно, эффективнее) использовать модификации проекционного функционального Алгоритма 1 (которые целесообразно называть **проекционно-сеточными методами**), для которых базисные функции (1.5) являются финитными, и носители этих функций сосредоточены вблизи соответствующих узлов  $x_i$  регулярной сетки (1.2) так, что

$$\int_X \varphi(x) \chi^{(x_i)}(x) dx \approx \varphi(x_i). \quad (4.3)$$

Здесь функции базиса (1.5) переобозначены как

$$\Xi^{(x^{(M)})} = \{\chi^{(x_1)}(x), \dots, \chi^{(x_M)}(x)\}. \quad (4.4)$$

Функции (4.4) могут уже не быть ортогональными, однако соотношения (4.3) позволяют приближенно вычислять значения решения  $\varphi(x)$  уравнения (1.1) в узлах сетки (1.2), используя соответствующие варианты основного весового оценителя (2.6).

АЛГОРИТМ 3 [3]. *Реализуя  $N$  траекторий (3.1) прикладной цепи Маркова (2.8), вычисляем значения*

$$\tilde{\varphi}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^{T_n} Q_n^{(t)} \chi^{(x_i)}(\xi_n^{(t)}); \quad i=1, \dots, M$$

(здесь веса  $Q_n^{(t)}$  вычисляются по формулам (2.10)). Затем вычисляем коэффициенты (1.11) по формулам (3.4) и используем приближение (1.12).

В любом случае требуется дополнительный сравнительный анализ рандомизированных проекционных и проекционно-сеточных методов (типа Алгоритмов 1 и 3) как с позиций теории условной оптимизации, так и с соображениями об эффективности их применения для численного решения интегральных уравнений Фредгольма второго рода (1.1), возникающих при исследовании актуальных прикладных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 368 с.
2. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. – 632 с.
3. Войтишек А.В. Функциональные оценки метода Монте-Карло. – Новосибирск: НГУ, 2007. – 76 с.
4. Боровков А.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1986. – 432 с.
5. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1984. – 744 с.
6. Фролов А.С., Ченцов Н.Н. Использование зависимых испытаний в методе Монте-Карло для получения гладких кривых // Труды Всесоюзного совещания по теории вероятностей и математической статистике. – Вильнюс, 1962. – С. 425–437.
7. Михайлов Г.А., Трачева Н.В., Ухинов С.А. Рандомизированный проекционный метод для оценки угловых распределений поляризованного излучения на основе численного статистического моделирования // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56. – № 9. – С. 1560–1570.

# ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ЗАРЯДКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ЗАПАЗДЫВАНИЯ

*Н.Л. Габрелян, А.В. Павельчук, А.Г. Масловская*

*Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия*

Системы типа «реакция – диффузия – адвекция (конвекция)» возникают при решении прикладных задач в гидродинамике, сейсмологии, биологии, химии, теории массо- и теплопереноса, радиационной физике и других научных областях. В числе известных приложений можно выделить отдельный класс систем, моделируемых уравнениями с частными производными параболического и гиперболического типов в присутствии эффекта запаздывания или наследственности [1–3]. Данный класс уравнений относят также к функционально-дифференциальным уравнениям. При моделировании процессов и явлений идею введения запаздывания часто обосновывают конечной скоростью распространения возмущений или инерционной природой системы, которая формирует отклик на внешнее воздействие не мгновенно, а с некоторым временным лагом. Следует заметить, что только для достаточно ограниченного класса задач в постановке уравнений с частными производными параболического типа с эффектом запаздывания можно построить аналитические решения [3]. Вместе с тем для изучения объекта на основе постановки и проведения вычислительного эксперимента требуется построить гибкую и эффективную вычислительную схему. В связи с этим широкое распространение на практике получили численные методы, в том числе конечно-разностные [4–6].

В ряде работ [7–9] были развиты математические модели стационарного и эволюционного процессов зарядки полярных диэлектриков в условиях облучения пучком электронов. В указанных работах сконструированы различные варианты вычислительных схем, предназначенные для программной реализации модели и базирующиеся на использовании конечно-разностных схем расщепления (явной схемы расщепления, метода дробных шагов Яненко, метода переменных направлений). Эффект запаздывания реакции системы на внешнее воздействие может

быть учтен в соответствующем соотношении математической постановки задачи. Поэтому данная работа направлена на разработку вычислительной схемы, предназначенной для программной реализации физико-математической модели зарядки диэлектриков в присутствии эффекта запаздывания по времени.

### **Математическая постановка задачи моделирования электронно-индуцированной зарядки диэлектриков с запаздыванием**

Математическая модель процесса электронно-индуцированной зарядки диэлектриков представляет собой формализацию сложной системы, которая включает: систему уравнений с частными производными, инициализацию внутреннего источника неравновесных носителей заряда и совокупность соотношений для вычисления характеристик процесса зарядки [9].

Динамическая зарядка диэлектриков происходит при внешнем поле-вом воздействии на материал. В нашем случае источником такого поле-вого воздействия является облучение потоком электронов вследствие того, что при попадании электронов в образец диэлектрика происходит накопление поглощенных электронов, образуются заряженные области. Результатом такого воздействия является изменение электрических ха-рактеристик материала. Будем считать, что определению подлежат: объемная плотность зарядов, напряженность электрического поля, потенциал и поляризация.

Модель включает в себе уравнение неразрывности и уравнение Пуас-сона, которые определяют: временную зависимость объемной плотности зарядов, созданных источником в материале, и полевую характеристику – напряженность электрического поля. Для перехода к частной постановке задачи примем цилиндрическую симметрию задачи и представим гео-метрию образца и внутреннего источника так, как показано на рис. 1, где параметры  $R$  и  $Z$  – характерные размеры расчетной области.

Принимая во внимание физические законы и механизмы, опреде-ляющие диффузионный характер модели процесса зарядки, можно предположить, что эффект запаздывания реакции системы на внешнее воздействие может быть учтен в соответствующем соотношении мате-матической постановки задачи. В предлагаемой модификации модели примем, что система реагирует на изменение градиента плотности ин-жектированных зарядов изменением диффузионного тока не мгновенно, а с некоторым временным лагом  $t^*$ .

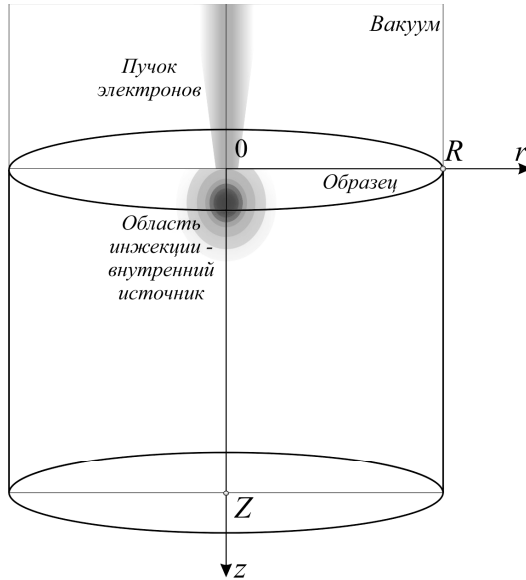


Рис. 1. Схематическое представление геометрии образца и внутреннего источника

Модифицированная постановка задачи представляет начально-граничную задачу для системы уравнений: функционально-дифференциального уравнения параболического типа, уравнения Пуассона и выражения, связывающего напряженность с потенциалом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho(r, z, t)}{\partial t} &= G(r, z) - \frac{\mu_n}{\varepsilon \varepsilon_0} \rho(r, z, t)^2 - \mu_n \left( E_r \frac{\partial \rho(r, z, t)}{\partial r} + E_z \frac{\partial \rho(r, z, t)}{\partial z} \right) + \\ &+ D \left( \frac{\partial^2 \rho(r, z, t - t^*)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho(r, z, t - t^*)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \rho(r, z, t - t^*)}{\partial z^2} \right), \quad (1) \\ \frac{\partial^2 \varphi(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi(r, z, t)}{\partial z^2} &= - \frac{\rho(r, z, t)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \\ \mathbf{E}(r, z, t) &= -\text{grad} \varphi(r, z, t), \end{aligned} \right.$$

где  $0 \leq r \leq R$ ,  $0 \leq z \leq Z$  – геометрические размеры объекта;  $0 < t \leq T$  – период действия источника;  $\rho$  – объемная плотность заряда, Кл/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  –

диэлектрическая проницаемость материала;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $G$  – генерационное слагаемое, отвечающее за действие объемного источника зарядов в объекте, Кл/(м<sup>3</sup>·с);  $\varphi$  – потенциал, В;  $E$  – напряженность поля, В/м;  $D = \mu_n kT/e$  – коэффициент диффузии электронов, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_n$  – дрейфовая подвижность электронов, м<sup>2</sup>/(В·с);  $k$  – константа Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура, К;  $e$  – заряд электрона, Кл.

Дополним (1) начальным условием:

$$\rho(r, z, t) = \rho^0(r, z, t) \text{ при } -t^* \leq t \leq 0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq Z \quad (2)$$

и соответствующими физическому смыслу задачи граничными условиями:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \rho}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \rho}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \rho|_{z=Z} = 0, \quad \rho|_{r=R} = 0, \\ \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \varphi|_{z=Z} = 0, \quad \varphi|_{r=R} = 0 \text{ при } t \in (0, T]. \end{aligned} \quad (3)$$

Размеры расчетной области, определяемые  $R$  и  $Z$ , целесообразно актуализировать для локальной зоны динамического изменения характеристик с учетом требования удовлетворения граничных условий.

### Вычислительная схема реализации модели

Реализация модели требует построения гибридной вычислительной схемы, включающей: стохастическое моделирование транспорта электронов в облученной мишени на основе метода Монте-Карло и численное решение эволюционного и стационарного уравнений математической физики с использованием сеточных методов.

*Вычислительная схема решения детерминированной задачи.* Для конструирования вычислительной схемы реализации модели в постановке (1) – (3) была использована неявная конечно-разностная схема расщепления [10]. Опишем алгоритм решения реакционно-диффузионного функционально-дифференциального уравнения (уравнения неразрывности) с использованием аналога неявного метода Яненко.

Введем конечно-разностную сетку:

$$w_{h_1, h_2}^\tau = \{x_i = ih_1, i = \overline{1, N}; y_j = jh_2, j = \overline{1, M}; t_k = k\tau, -q \leq k \leq K\},$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – шаги по координатам;  $\tau$  – шаг по времени;  $q = t^*/\tau$  – индекс, соответствующий временному лагу,  $t^*$  – время запаздывания.

Конечно-разностная схема конструируется в два этапа с введением аппроксимации для уравнения и граничных условий на двух временных слоях, первый из которых соответствует полшагу по времени  $\tau/2$ , второй – шагу  $\tau$ . Первая подсхема получается расщеплением по координате  $x$  на дробном шаге  $\tau/2$ . Для всех внутренних узлов получим конечно-разностную аппроксимацию уравнения неразрывности в виде

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{ij}^{k+1/2} - \rho_{ij}^k}{\tau} = G_{ij}^{k+1/2}(r_i, z_j) - \mu_n \left( E_r \frac{\rho_{i+1j}^{k+1/2} - \rho_{i-1j}^{k+1/2}}{2h_1} \right) + \\ + D \left( \frac{\rho_{i+1j}^{k-q} - 2\rho_{ij}^{k-q} + \rho_{i-1j}^{k-q}}{h_1^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\rho_{i+1j}^{k-q} - \rho_{i-1j}^{k-q}}{2h_1} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$i = \overline{2, N-1}, j = \overline{1, (M-1)}.$$

Для граничных узлов  $\rho_{Nj}$  используем выполнение краевых условий:  $\rho_{Nj} = 0, j = \overline{1, M}$ . Для первого уравнения системы (4) (при  $i = 1$ ) требуется удовлетворить граничному условию II рода. Для сохранения порядка аппроксимации производной по координате введем систему фиктивных узлов на слое  $i = 0$ . Граничные узлы  $u_{1j}$  ( $j = \overline{1, M-1}$ ) будут иметь аппроксимацию II порядка точности:

$$\frac{\partial u_{1j}}{\partial x} = \frac{u_{2j} - u_{0j}}{2h_1} + O(h_1^2) = 0,$$

из этого получим значение в фиктивном узле  $u_{0j} = u_{2j}$  для  $j = \overline{1, M-1}$ . Отсюда с использованием общей схемы (4) определим конечно-разностную аппроксимацию для всех  $i = 1$  при  $j = \overline{1, M-1}$ .

Вторая подсхема получается аналогично расщеплением по координате  $y$  на полном дробном шаге  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{ij}^{k+1} - \rho_{ij}^{k+1/2}}{\tau} = - \frac{\mu_n}{\varepsilon \varepsilon_0} \rho_{ij}^{k+1/2} \rho_{ij}^{k+1} - \mu_n \left( E_z \frac{\rho_{ij+1}^{k+1} - \rho_{ij-1}^{k+1}}{2h_2} \right) + \\ + D \left( \frac{\rho_{ij+1}^{k-q} - 2\rho_{ij}^{k-q} + \rho_{ij-1}^{k-q}}{h_2^2} \right), i = \overline{1, (N-1)}, i = \overline{2, (N-1)}. \end{aligned} \quad (5)$$



В конечно-разностной системе (5) также учитывается значение функции в граничном узле  $\rho_{i,M} = 0$ ,  $j = \overline{1, N}$ , а первое уравнение модифицируется с использованием аппроксимации граничного условия II рода.

С целью конечно-разностной аппроксимации в правой части нелинейного слагаемого (формула (5)) использован метод замороженных коэффициентов – расчет реакционного слагаемого происходит заменой квадрата функции на произведение значения дискретной функции на слое  $t$  и  $t+\tau/2$ .

Для старта вычислений используем условие, задающее предысторию процесса:  $\rho(r_i, z_j, t_k) = \rho_{i,j}^0$ .

Решение второго уравнения системы, уравнения Пуассона, также основано на использовании неявной схемы метода расщепления. Сконструированная схема имеет второй порядок аппроксимации по координатам и первый – по времени, абсолютно устойчива, является экономичной и легко программируется. Алгоритмической особенностью решения уравнения с запаздыванием является использование для расчета значений искомой функции на временном слое  $k+1$  значений этой функции для слоя  $k+1-q$ . Это приводит к необходимости хранения значений функции на  $q$  предыдущих временных слоях в динамическом массиве, который перезаписывается на каждом временном слое.

*Спецификация внутреннего источника.* Определение геометрии внутреннего источника и введение аналитической аппроксимации функциональной зависимости распределения потерь энергии в облученном материале требует проведения симуляции транспорта электронов. Для моделирования распределения электронных траекторий был применен метод Монте-Карло [7]. Моделирование транспорта электронов позволяет задать начальное распределение плотности зарядов в образце  $\rho^0(r, z, t)$  при решении задачи о моделировании релаксационных процессов или функцию, определяющую генерационное слагаемое  $G(r, z)$ , для задачи моделирования динамики зарядки диэлектрика.

*Расчет координатных зависимостей вектора напряженности и индуцируемой электронным зондом компоненты вектора поляризации.* В отличие от потенциала  $\phi$ , напряженность электрического поля  $E$  является векторной величиной, которая в каждой точке пространства характеризуется значением поля и направлением. Связь между напряженностью и

потенциалом  $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$  и применение соответствующей функции для вычисления градиента позволяют определить компоненты  $(E_r, E_z)$  и значение модуля вектора напряженности  $|\mathbf{E}| = \sqrt{(E_r)^2 + (E_z)^2}$ . Степень поляризации диэлектрика, индуцируемая инжекцией электронного пучка, характеризуется вектором поляризации  $\mathbf{P}$ , для вычисления которого можно воспользоваться связью между вектором напряженности и вектором поляризации:  $\mathbf{P} = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0\mathbf{E}$ .

### Заключение

Таким образом, в работе предложена обобщенная физико-математическая модель процесса электронно-стимулированной зарядки полярных диэлектриков с учетом эффекта запаздывания по времени. Для решения нелинейного функционально-дифференциального уравнения параболического типа предложено использовать аналог неявного метода расщепления. Программная реализация модели предполагает конструирование алгоритма на основе гибридной вычислительной схемы, сочетающей сеточное решение задачи математической физики и стохастическое моделирование электронных траекторий в облученном материале при заданных модельных параметрах, отвечающих условиям эксперимента.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Wu J.* Theory and applications of partial functional differential equations. – New York: Springer, 1996. – 368 p.
2. *Kolmanovskii V.B. and Myshkis A.D.* Introduction to the theory and Applications of Functional Differential Equations. – Dordrecht: Kluver, 1999. – 648 p.
3. *Polyanin A.D. and Zhurov A.I.* Exact solutions of linear and nonlinear differential-difference heat and diffusion equations with finite relaxation time // Int. J. Non-Linear Mechanics. – 2013. – V. 54. – P. 115–126.
4. *Jin C.R.* The numerical methods for solving some delay differential equations: Ph.D. Paper of Harbin Institute of Technology, 2006. – P. 37–59.
5. *Garcia P., Castro M.A., Martin J.A., Sirvent A.* Numerical solutions of diffusion mathematical models with delay // Mathematical and Computer Modelling. – 2009. – V. 50. – P. 860–868.
6. *Лекомцев А.В.* Численные алгоритмы решения некоторых классов эволюционных уравнений с запаздыванием: автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – Екатеринбург, 2010. – 24 с.
7. *Масловская А.Г., Сивунов А.В.* Компьютерное моделирование методом Монте-Карло электронных траекторий в полярных диэлектриках при воздействии

- 
- электронными пучками средних энергий // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 53–58.
8. *Maslovskaya A.G. and Sivunov A.V.* Simulation of electron injection and charging processes in ferroelectrics modified with the SEM-techniques // *Solid State Phenomena*. – 2014. – V. 213. – P. 119–124.
  9. *Maslovskaya A. and Pavelchuk A.* Simulation of dynamic charging processes in ferroelectrics irradiated with SEM // *Ferroelectrics*. – 2015. – V. 476. – P. 157–167.
  10. *Яненко Н.Н.* Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 197 с.

# НАХОЖДЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ БЕЗУ С ПОМОЩЬЮ РАСШИРЕННОГО ОБОБЩЕННОГО БИНАРНОГО АЛГОРИТМА

*Р.Р. Еникеев*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

В статье описывается нахождение коэффициентов Безу  $x, y$ , удовлетворяющих  $u \cdot x + v \cdot y = \text{НОД}(u, v)$ , с помощью расширенного обобщенного бинарного алгоритма. Он наиболее часто применяется в криптографии и теории чисел для поиска обратного элемента по модулю.

## Введение

Число  $c$  – общий делитель чисел  $u$  и  $v$ , если они делятся на  $c$  без остатка. Наибольший общий делитель (НОД) двух целых чисел  $u$  и  $v$  называется наибольшим из их общих делителей и обозначается как  $g = \text{НОД}(u, v)$ .

**Утверждение 1.** Пусть  $u$  и  $v$  – целые числа. Тогда существуют  $x$  и  $y$ , такие, что

$$u \cdot x + v \cdot y = g. \quad (1)$$

Равенство (1) называется соотношением Безу, а числа  $x$  и  $y$  – коэффициенты Безу. Алгоритм, который находит коэффициенты Безу, называется расширенный алгоритм поиска НОД.

## Удаление из $u, v$ общих факторов с $k$

В начале  $k$ -арного алгоритма мы удаляем из  $u, v$  общие факторы с  $k$  и сохраняем в  $g'$ :

**Алгоритм 1.** Удаление из  $u, v$  общих факторов с  $k$

```
g' := 1; u' := u; v' := v
Для каждого d делителя k do
  while d|u' and d|v' do
    u' := u'/d, v' := v'/d, g' := g' * d
u := u'; v := v' (*)
```

В случае, когда  $k$  степень двойки, мы очень быстро удаляем общие факторы с помощью сдвига вправо.

Покажем, что коэффициенты Безу у  $u$ ,  $v$  (до строки (\*)) и  $u'$ ,  $v'$  будут одинаковыми. По свойству НОД получим

$$\text{НОД}(u, v) = \text{НОД}(u * g', v * g') = g' * \text{НОД}(u', v'),$$

т.е.  $\text{НОД}(u', v') = g/g'$ . Запишем уравнение Безу для  $u'$ ,  $v'$ :

$$x \cdot u' + y \cdot v' = \text{НОД}(u', v').$$

Умножив обе части на  $g'$ , получим уравнение (1). Таким образом, удаление общих факторов не влияет на коэффициенты Безу. Поэтому, вычисляя коэффициенты Безу для  $u'$ ,  $v'$ , мы найдем коэффициенты и для  $u$ ,  $v$ .

### Главный цикл $k$ -арного алгоритма

Рассмотрим последовательности:

$$\begin{array}{ll} u_0 = u & u_0 = u \cdot x_0 + v \cdot y_0 \\ u_1 = v & u_1 = u \cdot x_1 + v \cdot y_1 \\ \dots & \dots \\ u_i = (a_i \cdot u_{i-2} + b_i \cdot u_{i-1}) / k & u_i = u \cdot x_i + v \cdot y_i \\ \dots & \dots \\ u_n = g = (a_n \cdot u_{n-2} + b_n \cdot u_{n-1}) / k & u_n = u \cdot x_n + v \cdot y_n \\ 0 = (a_{n+1} \cdot u_{n-1} + b_{n+1} \cdot u_n) / k & 0 = u \cdot x_{n+1} + v \cdot y_{n+1} \end{array}$$

В левом столбце преобразование главного цикла  $k$ -арного алгоритма  $u_i = (a_i \cdot u_{i-2} + b_i \cdot u_{i-1}) / k$ . Справа выражаем  $u_i$  через  $u$  и  $v$ . Если  $u_i > u_{i-1}$ , мы меняем их местами как справа, так и слева. На  $n$ -м шаге получаем НОД  $u$  и  $v$ , т.е.  $u_n = g$ . Подставив это значение в правый столбец, получим  $g = u \cdot x_n + v \cdot y_n$ , т.е.  $x_n$  и  $y_n$  являются коэффициентами Безу для  $u$  и  $v$ .

Очевидно, что  $x_0 = 1$ ,  $x_1 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $y_1 = 1$ . Теперь выразим  $x_{i+1}$ ,  $y_{i+1}$  через  $x_i$ ,  $y_i$  соответственно. Для этого подставим в левую часть значения  $u_{i-2}$  и  $u_{i-1}$  из правой части и упорядочим по  $u$  и  $v$ :

$$u_i = [u(a_i \cdot x_{i-2} + b_i \cdot x_{i-1}) + v(a_i \cdot y_{i-2} + b_i \cdot y_{i-1})] / k.$$

Отсюда находим  $x_i$ ,  $y_i$ :

$$x_i = (a_i \cdot x_{i-2} + b_i \cdot x_{i-1}) / k,$$

$$y_i = (a_i \cdot y_{i-2} + b_i \cdot y_{i-1}) / k.$$

Как можно заметить, формулы вычисления  $x_i$  и  $y_i$  похожи, поэтому в последующих рассуждениях мы будем рассматривать  $x_i$ , при этом все преобразования над  $x_i$  применяются и к  $y_i$ . После шага  $u_i = (a_i \cdot u_{i-2} + b_i \cdot u_{i-1}) / k$  нужно удалить  $f_i$  – общие делители  $u_i$  и  $k$ . Когда  $k$  – степень двойки,  $x_i$  будет вычисляться следующим образом:

$$x_i = (a_i \cdot x_{i-2} + b_i \cdot x_{i-1}) / (k \cdot 2^i). \quad (2)$$

Когда  $k$  степень двойки мы предлагаем в качестве коэффициентов Безу использовать структуру данных, реализующую рациональное число, только в знаменателе будем хранить не  $2^j$ , а саму степень двойки, т.е.  $j$ . И тогда при сложении двух рациональных чисел поиск общего знаменателя сведется не к поиску наименьшего общего кратного, а к нахождению максимального знаменателя. В алгоритме 2 описан главный цикл  $k$ -арного алгоритма, в котором вычисляются коэффициенты Безу.

**Алгоритм 2.** Главный цикл расширенного  $k$ -арного алгоритма

```

x0 = 1, x1 = 0, y0 = 0, y1 = 1
while v! = 0 do
    Удалить из v общие факторы с k
    c := (a * u + b * v) / k, где a * u + b * v = 0 (mod k)
    (x0, x1) := (x1, (a * x0 + b * x1) / (k * 2r1))
    (y0, y1) := (y1, (a * y0 + b * y1) / (k * 2r1))
    if c < 0 then
        c := -c, x1 = -x1, y1 = -y1
    if v > c then
        u := v, v := c
    else
        u := c
        swap(x0, x1), swap(y0, y1)
return u

```

### Обобщенные бинарные алгоритмы

Все обобщенные бинарные алгоритмы [2, 3, 6] используют преобразование  $k$ -арного алгоритма  $u_i = (a_i * u_{i-2} + b_i * u_{i-1}) / k$ , используя в качестве  $k$  степень двойки, т.е.  $k = 2^m$ . Они отличаются лишь способом

нахождения  $a_i, b_i$ , что, как видно из формулы (2), не влияет на нахождение  $x_i$ .

Преобразование  $(a \cdot u + b \cdot v) / 2^m$  эффективно, когда  $u$  и  $v$  достаточно близки друг к другу, поэтому обобщенные бинарные алгоритмы добавляют операцию  $\text{dmod}$  или похожую на нее. Операция  $\text{dmod}$  применяется, чтобы уменьшить длину  $u$ , когда  $\text{len}(u) - \text{len}(v) > l$ , где  $\text{len}$  – длина числа в бинарном представлении, а  $l$  – некоторая константа. При этом  $\text{dmod}$  никак не влияет на НОД, т.е.  $\text{НОД}(u, v) = \text{НОД}(v, \text{dmod}(u, v, 2))$ . После использования  $\text{dmod}$  применяется преобразование  $k$ -арного алгоритма  $(a \cdot u + b \cdot v) / 2^m$ .

$$\text{dmod}(u, v) = \frac{|u - (u/v \bmod 2^{\text{len}(u) - \text{len}(v) + 1})v|}{2^{\text{len}(u) - \text{len}(v) + 1}}$$

Операция  $\text{dmod}$  представима в виде  $(a \cdot u + b \cdot v) / 2^{\text{len}(u) - \text{len}(v) + 1}$ , что похоже на преобразование в  $k$ -арном алгоритме. В алгоритме 3 описан  $\text{dmod}$ , который возвращает  $a = \pm 1$  и  $b = \mp u / v \bmod 2^{\text{len}(u) - \text{len}(v) + 1}$ , где знаки зависят от знака числителя. В этом алгоритме используется константа  $W$ , обозначающая длину машинного слова.

### Алгоритм 3. Вычисление $\text{dmod}(u_0, v_0, 2)$

```

u := u0, a := 1, b := 0, i := 0
while len(u) > len(v0) + W do
  if u ≠ 0 (mod 2W) then
    q = u/v0 mod 2W
    b = q * 2W * i + b
    u := u - q * v0
  u := u/2W
  d := len(u) - len(v0) + 1
  if u ≠ 0 (mod 2d) then
    q = u/v0 mod 2d
    b = q * 2W * i + b
    u := u - q * v0
    if u < 0 then
      u := -u, a := -a, b := -b
    u := u/2d
return u, a, b

```

Введем переменную  $m_i$ , которая зависит от того, какое преобразование было применено на текущей итерации алгоритма:

$$m_i = \begin{cases} \text{len}(u) - \text{len}(v) + 1, & \text{при применении dmod,} \\ m, & \text{при применении } k\text{-арного алгоритма, при } k = 2^m. \end{cases}$$

Заменив  $k$  на  $2^{m_i}$  и проведя те же рассуждения, получим следующую формулу для вычисления  $x_i$ :

$$x_i = (a_i \cdot x_{i-2} + b_i \cdot x_{i-1}) / (2^{m_i} \cdot 2^{r_i}). \quad (3)$$

Учитывая, что  $u_i > u_{i+1}$  как после при применении  $k$ -арного алгоритма, так и после операции dmod для всех  $i$  [2], мы можем упростить формулу (3). Проведя замену, как описано в [5],  $x_i^* = x_i \cdot 2^{M_i} \cdot 2^{R_i}$ , где

$$M_i = \sum_{j=2}^i m_j \quad (m_0 = m_1 = 0), \quad R_i = \sum_{j=1}^i r_j \quad (r_0 = 0),$$

и подставив это значение в предыдущую формулу, получим

$$\begin{aligned} x_i^* / (2^{M_i} \cdot 2^{R_i}) &= [a_i \cdot x_{i-2}^* / (2^{M_{i-2}} \cdot 2^{R_{i-2}}) + b_i \cdot x_{i-1}^* / (2^{M_{i-1}} \cdot 2^{R_{i-1}})] / (2^{m_{i-1}} \cdot 2^{r_{i-1}}) \\ x_i^* &= a_i \cdot x_{i-2}^* \cdot 2^{m_{i-1}} \cdot 2^{r_{i-1}} + b_i \cdot x_{i-1}^*. \end{aligned} \quad (4)$$

Эта формула справедлива, только если  $u_{i-2} > u_{i-1}$  на предыдущем шаге, что выполняется для всех обобщенных расширенных алгоритмов, иначе не только  $x_i^*$  будет вычисляться по другой формуле ( $x_i^* = a_i \cdot x_{i-2}^* + b_i \cdot x_{i-1}^* \cdot 2^{m_{i-1}} \cdot 2^{r_{i-1}}$ ), но и  $x_{i+1}^*$ , так как мы меняем местами  $u_{i-2}$  и  $u_{i-1}$ . Значения начальных коэффициентов Безу не изменятся:  $x_0^* = 1$ ,  $x_1^* = 0$ ,  $y_0^* = 0$ ,  $y_1^* = 1$ .

### Удаление знаменателя из коэффициентов Безу

После  $n$  итераций алгоритма мы получим НОД:

$$\begin{aligned} u \cdot x^* + v \cdot y^* &= g, \\ u(x/t) + v(y/t) &= g, \quad t = 2^{M_n + R_n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Чтобы найти коэффициенты Безу  $x$  и  $y$ , мы должны избавиться от  $t$  в знаменателе. Перед главным циклом мы удалили общие факторы  $u$ ,  $v$  с  $k$ . Поэтому либо  $u$ , либо  $v$  не делятся на 2. Пусть  $u$  не делится на 2, иначе в



последующих формулах заменим  $u$  на  $v$ ,  $x$  на  $y$ . Так как  $u$  не делится на 2, то  $\text{НОД}(u, t) = 1$ , а значит, существует  $t^{-1} \bmod u$  и  $u^{-1} \bmod t$ . Тогда запишем уравнение Безу для  $u$  и  $t$ :

$$t \cdot t^{-1} + u \cdot u^{-1} = 1,$$

откуда находим

$$t^{-1} \bmod u = (1 - u \cdot u^{-1}) / t. \quad (6)$$

Вычислим  $u^{-1} \bmod t$ , используя эффективный алгоритм поиска обратного элемента по модулю  $2^h$ , описанный в [4]. Подставляя  $u^{-1} \bmod t$  в формулу (6), получаем  $t^{-1} \bmod u$ . Теперь найдем значения  $x, y$  способом, описанным в [5]:

$$x' = x^* \cdot t^{-1}; \quad y = y^* \cdot t^{-1}.$$

Тогда (5) будет выглядеть следующим образом:

$$u \cdot x' + v \cdot y' = g + j \cdot u.$$

Вычисляем  $j = (u \cdot x' + v \cdot y' - g) / u$  и находим  $x = x' - j, y = y'$ .

Если  $k$  – не степень двойки, тогда, чтобы избавиться от знаменателя  $t$ , нужно прибегнуть к способу, описанному ниже.

### Удаление ложных факторов

$\text{НОД}(u, v) | \text{НОД}(\min(u, v), (a^*u + b^*v)/k)$ , т.е. преобразование  $k$ -арного алгоритма  $(au+bv)/k$  сохраняет  $\text{НОД}(u, v)$ , добавляя в него ложные факторы (*spurious factors*) [1]. Пусть после главного цикла мы получили  $\text{НОД}(u, v)$  равный  $g'' = g \cdot s$ , где  $g$  – истинный НОД, а  $s$  – ложные факторы. Ложные факторы удаляются с помощью вычисления:

$$g = \text{НОД}(\text{НОД}(g'', u \bmod g), v \bmod g''). \quad (7)$$

Используя тот факт, что  $s$  намного меньше, чем  $u'$ , а  $g$  с большой долей вероятности маленькое число [2], мы можем эффективно вычислить  $u \bmod g''$  и  $v \bmod g''$  с помощью  $\text{dmod}$ .

Опишем, как ложные факторы влияют на коэффициенты Безу. На последнем шаге мы получили равенство  $u \cdot x + v \cdot y = g \cdot s$ , перепишем его в виде

$$u(x/s) + v(y/s) = g. \quad (8)$$

Для избавления от ложных факторов мы можем использовать способ, описанный в предыдущем разделе, но с некоторыми изменениями. Главное отличие от предыдущего метода состоит в том, что вычисление

$s^{-1}$  по модулю  $u$  или  $v$  невозможно, если  $\text{НОД}(s, u) \neq 1$  и  $\text{НОД}(s, v) \neq 1$ . Чтобы решить данную проблему, необходимо разложить  $s$  на два числа, одно из которых взаимно просто с  $u$ , другое – с  $v$ . Вначале вычислим  $u' = u/g$ ,  $v' = v/g$ , используя алгоритм деления без остатка (exact division) [4]. Затем произведем замену в формуле (8):

$$x(u'/s) + y(v'/s) = 1. \quad (9)$$

Теперь разложим на два множителя из  $s$  общие факторы с  $u'$  следующим алгоритмом:

**Алгоритм 4.** Разложение ложных факторов на множители

```

g := cgcd(u' mod s, s) // алгоритм Евклида поиска НОД
p := 1, q := s
while g != 1 do
  p * = g
  q // = g
  g := cgcd(q, g)
return p, q

```

В результате работы алгоритма мы получили, что  $p$  содержит общие факторы  $s$  с  $u'$ , а  $q$  взаимно простое с  $u'$  и  $p \cdot q = s$ .

Перепишем (9), используя  $p$  и  $q$ :

$$x(u'/q) + y(v'/q) = p.$$

Так как  $q$  взаимно простое с  $u'$ , найдем и подставим  $q^{-1} \bmod u'$  в предыдущее равенство:

$$x \cdot q^{-1} \cdot u' + y \cdot q^{-1} \cdot v' = p + j \cdot u'.$$

Сначала найдем значение  $j$ , а затем новые значения  $x$  и  $y$  так же, как в предыдущем разделе. После этого получим

$$\begin{aligned} x \cdot u' + y \cdot v' &= p, \\ x \cdot u'/p + y \cdot v'/p &= 1. \end{aligned}$$

Теперь выполним все то же самое, только с  $p$  и  $v'$ . Для этого покажем, что  $\text{НОД}(p, v') = 1$ . Пусть это не так, тогда существует простое  $f: f|p$  и  $f|v'$ . По условию нахождения  $p$  мы имеем, что  $w|u'$  для всех  $w: w|p$ . Получаем, что  $f|u'$ , отсюда следует, что  $\text{НОД}(u', v') \neq 1$ , но это невозможно, так как  $u'$  и  $v'$  взаимно простые из-за шага  $u' = u/g$ ,  $v' = v/g$ . Получили противоречие.

В итоге, избавившись от  $p$ , получаем

$$x \cdot u' + y \cdot v' = 1.$$

Умножая это равенство на  $g$  из (8), получим

$$x \cdot u + y \cdot v = g.$$

Перед завершением алгоритма  $g$  еще необходимо умножить на  $g'$  (сами коэффициенты не умножаются), полученное после удаления общих факторов  $u$ ,  $v$  с  $k$ . Таким образом, мы вычислили коэффициенты Безу и НОД чисел  $u$ ,  $v$ .

### Заключение

Мы описали расширенный  $k$ -арный алгоритм поиска НОД, который находит коэффициенты Безу, упростили нахождение коэффициентов Безу для обобщенных бинарных алгоритмов, а также показали, как избавиться от знаменателя в коэффициентах Безу и от ложных факторов в полученном НОД.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Sorenson J.* Two fast GCD Algorithms // J. Alg. – 1994. – V. 16. – No. 1. – P. 110–144.
2. *Weber K.* The Accelerated Integer GCD Algorithm // ACM Trans. Math. Software. – 1995. – V. 21. – No. 1. – P. 111–122
3. *Jebelean T.* A Generalization of the Binary GCD Algorithm // Proc. Of Intern. Symp. on Symbo. and Algebr. Comp. (ISSAC'93). – 1993. – P. 111–116
4. *Jebelean T.* An Algorithm for Exact Division // J. Symbolic Computation. – 1993. – V. 15.
5. *Ишмухаметов Ш.Т., Мубаракوف Б.Г., Маад Камал Ал-Анни.* Вычисление коэффициентов Безу для  $k$ -арного алгоритма нахождения НОД.
6. *Ishmukhametov S.T.* An approximating  $k$ -ary GCD algorithm // Lobachevskii J. Mathematics. – 2016. – V. 37. – Iss. 6. – P. 722–728.
7. *Ишмухаметов Ш.Т.* Методы факторизации натуральных чисел. – Казань: Казанский университет, 2011.
8. *Акритас А.* Основы компьютерной алгебры с приложениями. – М.: Мир, 1994.
9. *Гельфонд А.О.* Решение уравнений в целых числах. – М.: Наука, 1983. – С. 9–10.

# **РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО АЛГОРИТМА И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ**

***М.М. Исаев, Р.Б. Назаров, Н.Х. Бадалова,  
М.Б. Мамедова, Ф. Агаева***

*Институт систем управления  
Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан*

В настоящее время широкое развитие получают алгоритмические методы повышения точности измерений, основанные на использовании вычислительной техники, математического моделирования и реализации специальных алгоритмов обработки результатов измерений. Построение информационно-измерительной системы (ИИС) на основе этих методов позволяет обеспечить в ряде случаев высокую точность результатов измерений (РИ) при использовании низкоточных исходных измерительных систем (ИС). При измерении дополнительная информация может быть получена за счет наличия структурной, временной или структурно-временной избыточности ИИС [2].

Целью работы является исследование новой разновидности тестового метода (ТМ) повышения точности измерений для ИИС с нелинейными функциями преобразований (ФП), основанного на использовании в тестовых алгоритмах совокупностей тестов. Постановкой является решение задач разработки комбинированного алгоритма повышения точности измерений, реализованных на основе аддитивных и мультипликативных тестов, позволяющих определить измеряемые неэлектрические величины по результатам измерений дополнительных тестов, используемых для идентификации нелинейных функций преобразования ИИС, позволяющих получать высокоточные РИ неэлектрических величин.

При этом развитие алгоритмических методов повышения точности измерений ведется в двух основных направлениях:

- 1) разработка методов уменьшения коррелированной составляющей погрешности измерения, объединяющей все систематические, прогрессирующие и медленноменяющиеся случайные погрешности;
- 2) разработка методов уменьшения некоррелированной составляющей погрешности измерения, объединяющей все случайные погрешно-

сти, вызванные, например, шумами электронных элементов измерительных преобразователей (ИП), входящих в состав ИС.

Необходимо отметить, что разработка методов уменьшения коррелированной составляющей погрешности имеет особое значение для ИИС неэлектрических величин [2–5].

В общем случае параметры реальной ФП ИП являются нестационарными случайными функциями времени. В связи с этими погрешность ИП будет также являться нестационарной случайной функцией времени.

Для реальных ИИС она может быть представлена суммой:

$$\Delta y(t) = \bar{\Delta}y(t) + \dot{\Delta}y(t). \quad (1)$$

где  $\dot{\Delta}y(t)$  – стационарная, центрированная, эргодическая,  $\bar{\Delta}y(t)$  – нестационарная случайные функции времени.

Представление  $\Delta y(t)$  в виде (1) дает возможность разделить погрешность измерений в зависимости от частного спектра на две составляющие:

- автокоррелированную составляющую  $\bar{\Delta}y(t)$  погрешность  $\Delta y(t)$ , включающую в себя систематические, прогрессирующие и медленно меняющуюся относительно времени  $T$  случайные погрешности;

- составляющую  $\dot{\Delta}y(t)$  погрешности  $\Delta y(t)$  с малым временем автокорреляции – неавтокоррелированную составляющую погрешности, включающую в себя случайные некоррелированные погрешности типа «белого шума», вызванного, например, собственным шумом электронных и полупроводниковых элементов ИУ.

В дальнейшем исследование погрешности ИИС проводится на основе анализа полученного РИ как случайной функции времени.

При использовании алгоритмических методов задача повышения точности РИ, в зависимости от соотношения результирующей погрешности  $\Delta y(t)$  составляющих  $\bar{\Delta}y(t)$  и  $\dot{\Delta}y(t)$ , может решаться по двум основным направлениям.

Если в результирующей погрешности  $\Delta y(t)$  превалирует составляющая  $\dot{\Delta}y(t)$ , то используют алгоритмы на основе принципа фильтрации. Сюда можно отнести методы многократных измерений с последующей статистической обработкой РИ при неизменной входной вели-

чине в процессе получения дополнительной информации, а также алгоритмы оптимальной фильтрации при изменяющемся входном сигнале [6].

Во втором случае, когда в погрешности  $\Delta y(t)$  превалирует составляющая  $\tilde{\Delta} y(t)$ , следует различать два возможных подхода, которые позволяют исключить ее влияние на точность РИ. В основу одного из них положен принцип коррекции погрешности измерения. В зависимости от способа получения корректирующего сигнала в этой группе методов различают: метод вспомогательных измерений возмущающих воздействий, методы обратных преобразований (ОП), в частности итерационные методы [1, 2].

Другая группа методов связана с принципом параметрической идентификации статической ФП ИС.

Параметрическая идентификация предусматривает в процессе реализации алгоритма измерения определение параметров  $a_i(t)$  реальной ФП и на основании полученных результатов вычисления измеряемой величины.

Решение указанной задачи не требует знания номинальной ФП, так как не предусматривает вычисление погрешности измерения. Кроме того, знание текущих значений параметров ФП ИС, особенно закона их изменения во времени, позволяет осуществить прогнозирование, диагностику и определять ресурс системы, что имеет большое практическое значение.

Таким образом, алгоритмы идентификации позволяют решать более широкий круг вопросов, чем алгоритмы коррекции погрешностей, и поэтому являются более перспективными.

Наряду с методом образцовых мер (ОМ) в настоящее время для уменьшения коррелированной составляющей погрешности РИ ИИС часто пользуются методами ОП. Методы ОП позволяют, не определяя реальных значений параметров ФП ИС, повысить точность РИ за счет введения в исходную ИС точного ОП.

Отметим, что во многих практических случаях математическая модель (ММ) ФП исходной ИС может быть представлена полиномиальной функцией в виде

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1}. \quad (2)$$



ко вопрос использования тестов того или иного вида необходимо связать также с достижимой точностью образующих их аддитивных и мультипликативных постоянных составляющих  $\theta$  и  $K$ . Это обстоятельство вызвано тем, что точность РИ, с помощью тестовой ИИС, определяются, в первую очередь, точностью сформированных в системе тестов.

В этой связи следует отметить, что наиболее просто при измерении как электрических величин, так и неэлектрических с заданной точностью реализуются простые аддитивные и мультипликативные тесты и измеряемый параметр  $x$ .

Теоретические исследования тестовых методов повышения точности измерений, основанных на реализации в ИИС совокупностей простых аддитивных и мультипликативных тестов, достаточно подробно изложены в работах [2, 4].

Использование только аддитивных или мультипликативных тестов в общем случае при  $a_i \neq 0$  ( $i = 1, \dots, n$ ), вырождает ОТУ в тождество.

Действительно, из выражения (5) следует, что в случае применения одних простых аддитивных тестов вида  $A_\theta(x) = x + \theta_\theta$  ( $\theta = 1, \dots, n$ ) для ОТУ будем иметь

$$y_0 = \sum_{j=1}^n y_j \frac{\prod_{\substack{1 \leq \theta \leq n, \theta \neq j}} [A_\theta(x) - x]}{\prod_{\substack{1 \leq \theta \leq n, \\ \theta \neq j}} [A_\theta(x) - A_\ell(x)]} = \sum_{j=1}^n y_j \frac{\prod_{1 \leq \theta \leq n, \theta \neq j} [\theta_\theta]}{\prod_{\substack{1 \leq \theta \leq n, \theta \neq j \\ \theta \neq j^*}} [\theta_\theta - \theta_\ell]}, \quad (6)$$

а при использовании одних простых мультипликативных тестов вида  $K_g x$  ( $g = 1, \dots, n$ ) для того же выражения (5) получим

$$y_0 = \sum_{j=1}^n y_j \frac{\prod_{1 \leq g \leq n, g \neq j} [K_g - 1]}{\prod_{\substack{1 \leq g \leq n \\ \ell \neq j, \\ g \neq j}} [K_g - K_\ell]}. \quad (7)$$

Как видно из (6) и (7), ОТУ в этих случаях не зависят от  $x$ .

Необходимо отметить, что в случаях существенной нелинейности ФП исходной ИС для ее математического описания требуется полином



достаточно высокой степени. В связи с этим общее количество вводимых в ИИС тестов, необходимых для реализации алгоритма повышения точности измерения, возрастает прямо пропорционально степени аппроксимирующего полинома. Вследствие этого увеличивается составляющая погрешности РИ ИИС, связанная с точностью реализации тестов. Кроме того, введение в исходную ИС значительного числа тестов, особенно при измерении неэлектрических параметров, конструктивно не всегда возможно.

Очевидно, что с практической точки зрения особую ценность представляет тестовый ИИС, алгоритмы функционирования которого позволяют получить высокоточные РИ наиболее кратким путем. Поэтому на практике, как правило, при данной ММ ФП исходной ИС стремятся тем или иным путем понизить степень ОТУ относительно измеряемой величины и, тем самым, сузить область определения искомого корня. Для этого ФП ИИС по всему диапазону последовательно делится на нелинейными участки, между максимальными и минимальными точками.

Во многих случаях практической реализации ИИС неэлектрических величин ФП последних могут быть достаточно точно кусочно описаны полиномами второй степени вида

$$y = a_{1s} + a_{2s}x + a_{3s}x^2, \quad (8)$$

где  $s = 1, \dots, \ell^*$  – участок аппроксимации.

Исходя из этого, синтез тестового алгоритма в данной ИИС реализуется следующим образом. Для  $n = 3$  из [2] определяется оптимальная тестовая совокупность:

$$\begin{cases} x + \theta, \\ kx, \\ kx + \theta. \end{cases}$$

Исходя из нее, определяется структура тестовой ИИС (ТИИС), позволяющая реализовать в системе один аддитивный, один мультипликативный и один комбинированный тест. Затем, при известном  $n = 3$  и определенной тестовой совокупности, находятся общие тестовые уравнения (ОТУ) данной ТИИС:

$$y_0 = \frac{[x(k-1) + \theta](y_1 - y_2) + y_3(xk - x - \theta)}{[x(k-1) - \theta]}. \quad (9)$$

Так же определяется алгоритм обработки РИ, используемых в системе тестов относительно величины  $x$ :

$$x_{\text{выч}} = \frac{(y_1 - y_2) + (y_0 - y_3)}{(y_0 - y_3) - (y_1 - y_2)} \frac{\theta}{k-1}. \quad (10)$$

На рис. 1 приведена структурная схема указанной ТИИС, где БФАТ – блок формирования аддитивного теста; БФМТ – блок формирования мультипликативного теста.

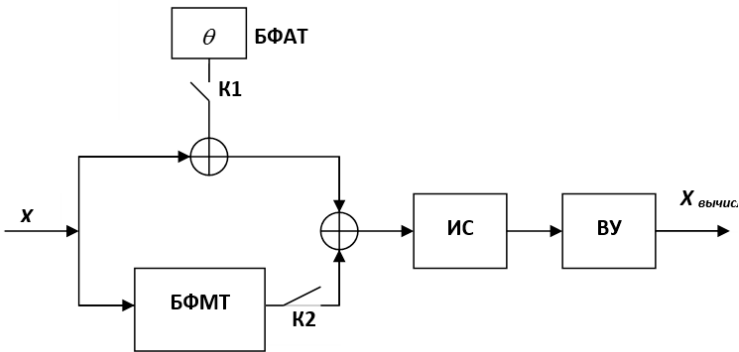


Рис. 1. Структурная схема ТИИС на основе комбинированных тестов

Процесс измерения состоит из четырех тактов. В первом такте измеряется исследуемый параметр  $x$ , во втором такте – аддитивный тест  $x + \theta$ , в третьем такте – мультипликативный тест  $xk$ , в четвертом такте – комбинированный тест  $xk + \theta$ .

Соотношения, связывающие РИ с измеряемыми величинами  $x$ ,  $x + \theta$ ,  $xk$  и  $xk + \theta$ , имеют при этом следующий вид:

$$\begin{cases} y_0 = a_{1s} + a_{2s}x + a_{3s}x^2, \\ y_1 = a_{1s} + a_{2s}(x + a_{3s} + \theta) + (x + \theta)^2, \\ y_2 = a_{1s} + a_{2s}xk + (xk)^2, \\ y_3 = a_{1s} + a_{2s}(xk + \theta) + a_{3s}(xk + \theta)^2. \end{cases} \quad (11)$$

Обработывая полученные результаты  $y_0, \dots, y_3$  измерений по алгоритму (10) на ЭВМ ТИИС, определяют измеряемую величину  $x$ .

Таким образом, как следует из вышеизложенного, применение разработанных способов построения алгоритмов функционирования ИИС позволяет наряду с достоинствами, которые характерны для ТИИС, реализованных на основе простых аддитивных и мультипликативных тестов, получить в новой модификации тестовых систем ряд новых качеств:

- упрощение алгоритмов работы ЭВМ, позволяющих определить величину  $x$  по результатам дополнительных измерений тестов, используемых для идентификации нелинейных ФП ИИС;

- значительное снижение числа используемых постоянных составляющих тестов, необходимых для идентификации нелинейных ФП ИИС;

- существенное упрощение процедуры линеаризации ФП ТИИС с нелинейными ФП за счет уменьшения необходимого для ее осуществления числа измерений дополнительных тестов.

Использование в ТИИС оптимальных совокупностей аддитивных и комбинированных тестов позволяет ограничить число измерений дополнительных тестов, формируемых в системе для линеаризации нелинейного ОТУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Т.М., Сейдель Л.Р. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
2. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
3. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей из мерительных устройств. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 199 с.
4. Исаев М.М. Методы и средства коммерческого учета нефтепродуктов в потоке. – Баку: Изд-во Элм, 2010. – 164 с.
5. Исаев М.М., Мамедов Р.Г., Мехтизаде Э.К., Гусейнов И.Э. Повышение точности измерений с помощью комбинированных тестовых алгоритмов // Известия НАН Азербайджана. Серия физико-математических и технических наук. – Т. XXIX. – № 6. – 2009. – С. 158–165.
6. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1986. – 248 с.

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА НЕФТИ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТОЧНОСТИ**

***М.Б. Мамедова, Р.Б. Назаров, М.М. Исаев, Н.Х. Бадалова***

*Институт систем управления*

*Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан*

Известно, что при определении массы жидкости в резервуаре используется таблица индивидуальной калибровки (ТИК). Для каждого процесса измерения средняя площадь поперечного сечения резервуара определяется из ТИК. В настоящее время погрешность используемого ТИКа составляет  $\pm 0,2\%$  [1–5]. Эта погрешность составляет около половины ( $\pm 0,5\%$ ) общей погрешности при определении массы жидкостей. Основная причина заключается в примитивности методов для определения ТИКа, которые, наряду с применением геометрического способа, практически полностью осуществляется вручную, физические параметров продукта определяются в лабораторных анализах, а для процесса калибровки требуется несколько месяцев, а также в других причинах, которые в итоге приводят к росту неточности. Таким образом, эти причины лежат в основе получаемых больших нарушений в коммерческом учете жидкостной массы, оставшейся в резервуаре, и в результате значительное количество нефтяного продукта остается в НР. А это означает серьезный экономический ущерб для предприятия.

Для достижения высокой точности измерений в процессе калибровки наряду с высокой точностью измерения массы ЖТ в резервуаре также надо учитывать деформации стенок резервуара (постепенное изменение в поперечном сечении) за счет гидростатического давления столбом ЖТ – значения, которые необходимо определять.

В известном процессе калибровки объем жидкости, вводимой в резервуар, измеряется механическим счетчиком, высота столба жидкости – с помощью линейки (рулетки), температура в резервуаре – термометрами, установленными по диагонали на тех точках [1–5]. Средняя плотность жидкости в резервуаре измеряется в лабораторных условиях на основе образцов, взятых в этих трёх точках. Составление ТИКа ведут на основе параметров объема столба ЖТ, средней площади поперечного

сечения и действия гидростатического давления при деформации боковых стенок резервуара. Основные ошибки измерения появляются при определении параметров счетчика, линейки, термометра, плотности, гидростатического давления, деформации и т.д.

Кроме них, определяются высота каждого столба жидкости в соответствии со средними областями поперечного сечения (определяется на основании верхней и нижней зоны), размеры внешней и внутренней поверхности резервуаров, толщина стенки, физико-химических свойств подготовленного материала, и на их основе все поправочные коэффициенты (деформация стенки резервуара, влияние температуры окружающей среды, состояние резервуара и т.д.), входящие в ТИК. Как видно, полученный для каждого резервуара ТИК является достаточно сложным, и в конечном счете точность ТИК в соответствии с существующим ГОСТ составляет  $\pm 0,2\%$  [1–3].

Высокоточное измерение гидростатического давления столба жидкости в резервуаре осуществляется с помощью дифференциальных датчиков давления [6–8]. Совместимость схематического и программного обеспечения со всеми техническими средствами позволяет создавать новую структуру калибровочной системы, значительно упрощая сложные процессы измерения и управления, что позволяет достигать довольно высокой точности измерения и эффективного управления [9, 10].

Выбирается стандартная (примерная) емкость (СЕ) эталонного объема, которая соответствует калибровочному нефтяному резервуару (КНР) и выполняется по особой конструкции (рис. 1). Для наполнения СЕ жидким топливом через насос (Н) общего коллектора (ОК) с помощью электронного вентиля ЭВ1 четырехсторонней трубы, для выгрузки ЖТ на КНР по наклонной трубе с электронного вентиля ЭВ2 и для измерения гидростатического давления ЖТ, находящегося в СЕ, с помощью дифференциального передатчиков давления (ДПД), соединены через вертикальную трубу. СЕ и КНР являются замкнутой емкостью, поэтому когда заполняется ЖТ, в верхней поверхности жидкости (свободной поверхности) накапливается газозадушенная смесь с определенным давлением, и это существенно влияет на результаты измерений. Для того чтобы учесть этот эффект, в процессе измерения свободные поверхности двух емкостей соединяются друг с другом и с воздухоотрубой (ВТ). Вентиль В3 используется для подключения СЕ к системе, а В4 – для истечения избытка ЖТ на ОК после заполнения.

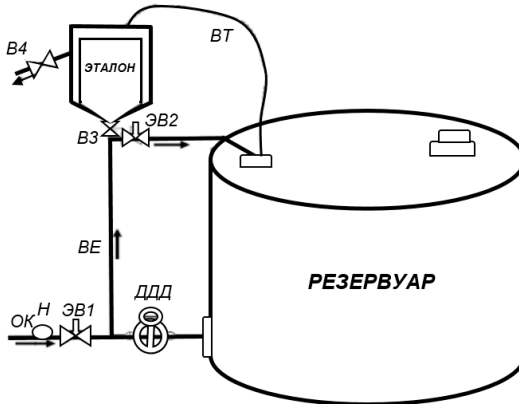


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической калибровки

**Алгоритм калибровки.** В начале (до включения насоса) электронный вентиль ЭВ1 закрыт, а электронный вентиль ЭВ2 открыт, измеряется выходной сигнал ДПД и определяется начальное значение измеряемой величины  $\Delta p_0 = 0$ . Такие значения разницы давления соответствует пустому состоянию двух емкостей и в случае отличных от нуля значений это значение учитывается в результатах следующих измерений тактов, корректирующего коэффициента:

1. Насос включается, электронный вентиль ЭВ1 открывается, а электронный вентиль ЭВ2 закрывается, СЕ начинает заполняться, насос открывается тогда, когда заполнение завершается, ЭВ1 закрывается, суммарное давления  $p_{1CE} + p_{VT} + p_{воздCE}$  в СЕ и VT передают на «+» камеры дифференциальных передатчиков давления (ДПД), а давление воздуха в калибровочном резервуаре  $p_{воздДНР}$  на «-» камеры ДПД, таким образом измеряется разница давления  $\Delta p_1$

$$\Delta p_1 = p_{1CE} + p_{VT} + p_{воздCE} - p_{воздДНР}, \quad (1)$$

где  $p_{1CE}$ ,  $p_{VT}$ ,  $p_{воздCE}$ ,  $p_{воздДНР}$  – давление воздуха соответственно на СЕ, вертикальный трубе (VT), жидкой поверхности СЕ и внутри КНР. Воздушные пространства обеих емкостей связаны с воздухоотрубой (VT) давления и будет уравниваться  $p_{воздCE} = p_{воздКНР}$ . Тогда формула (1) упрощится до следующего вида:

$$\Delta p_1 = p_{1CE} + p_{BT} = m_1 \cdot g / S_{ор.СЕ} + p_{BT}. \quad (2)$$

Здесь  $m_1$  – масса ЖТ на СЕ;  $g = 9,81$  Н/кг – ускорение свободного падения, созданное силой тяжести;  $S_{ор.СЕ}$  – средняя площадь поперечного сечения (постоянная).

Найдем массы ЖТ на СЕ из формулы (2):

$$m_1 = (\Delta p_1 - p_{BT}) S_{ор.СЕ} / g. \quad (3)$$

2. Электронный клапан ЭВ2 открывается, масса ЖТ  $m_1$  выгружается на КНР, после заполнения гидростатическое давление, созданное  $m_1$  массой, входит на «←» камеры ДПД, давление ЖТ на ВТ входит на «+» камеры ДПД, затем измеряется разница давлений:

$$\Delta p_{11} = p_{BT} - p_{1ДПД} = p_{BT} - M_1 \cdot g / S_{ДПД.1.ор.}, \quad (4)$$

где  $p_{1ДПД}$  – гидростатическое давление, создаваемое  $M_1 = m_1$  ЖТ на КНР;  $S_{ДПД.1.ор.}$  – средняя площадь поперечного сечения первого столба жидкости на КНР.

3. Электронный клапан ЭВ 2 закрывается, а электронный клапан ЭВ1 открывается, насос включается и СЕ наполняется ЖТ. После заполнения насос включается, ЭВ1 закрывается, суммарное давление на СЕ и ВТ передают «+» камеры дифференциального передатчиков давления (ДПД), а давление  $p_{1ДНЦ}$  ЖТ с массой  $m_1$  на КНР на «←» камеры ДПД, затем измеряется разница давлений  $\Delta p_2$ :

$$\Delta p_2 = p_{2СЕ} + p_{BT} - p_{1КНР} = m_2 \cdot g / S_{ор.СЕ} + p_{BT} - m_1 \cdot g / S_{КНР.1.ор.}. \quad (5)$$

Найдем  $m_2$  массы от формулы (5):

$$m_2 = (\Delta p_2 - p_{BT}) S_{ор.СЕ} / g + m_1 \cdot S_{ор.СЕ} / S_{КНР.1.ор.}. \quad (6)$$

4. Электронный клапан ЭВ2 открывается, ЖТ с массой  $m_2$  выгружается от СЕ на КНР, после заполнения КНР осуществляются следующие операции измерения ДПД:

$$\Delta p_{12} = p_{BT} - p_{2КНР} = p_{BT} - M_2 \cdot g / S_{КНР.2.ор.}, \quad (7)$$

где  $p_{2КНР}$  – гидростатическое давление, созданное  $m_1 + m_2$  ЖТ на КНР;  $S_{КНР.2.ор.}$  – средняя площадь поперечного сечения второго столба жидкости на КНР.

Таким образом, периодически операция измерений повторяется последовательно до заполнения резервуара и общее количество ЖТ, заполненного от СЕ на КНР, рассчитывается следующим образом:

$$M = m_1 + m_2 + \dots + m_N. \quad (8)$$

На основе результатов измерений соответственно рассчитывается для каждого столбца средняя площадь поперечного сечения, а после завершения процесса формируется ТИК. Собранные информация на памяти ЭВМ хранится в виде базы данных, играя важную роль в текущей калибровке и финансово-хозяйственной деятельности компании, а также проведении коммерческого расчета. По результатам процесса калибровки можно подавать требуемую структуру ТИК. В общем виде полученные алгоритмы в соответствии с каждым измерением представлены в таблице.

Ряд измерения	Масса ЖТ на СЕ	Масса ЖТ на КНР
1	$m_1 = (\Delta p_1 - p_{\text{ВТ}}) \cdot S_{\text{ор.СЕ}} / g$	$M_1 = (p_{\text{ВТ}} - \Delta p_{11}) \cdot S_{\text{КНР1.ор}} / g$
2	$m_2 = (\Delta p_2 - p_{\text{ВТ}}) \cdot S_{\text{ор.СЕ}} / g$	$M_2 = (p_{\text{ВТ}} - \Delta p_{12}) \cdot S_{\text{КНР2.ор}} / g$
3	$m_3 = (\Delta p_3 - p_{\text{ВТ}}) \cdot S_{\text{ор.СЕ}} / g$	$M_3 = (p_{\text{ВТ}} - \Delta p_{13}) \cdot S_{\text{КНР3.ор}} / g$
...	.....	.....
N	$m_N = (\Delta p_N - p_{\text{ВТ}}) \cdot S_{\text{ор.СЕ}} / g$	$M_N = (p_{\text{ВТ}} - \Delta p_{1N}) \cdot S_{\text{КНРN.ор}} / g$

Полученные результаты (таблица) являются более эффективными для использования при индивидуальной калибровке нефтяных резервуаров желаемой формы, а их фундаментальное отличие заключается в высокой точности измерений, гораздо большей простоте, чем предыдущие ТИК. Реализация полностью автоматизированного процесса приводит к сокращению времени, рабочей силы и финансовых затрат, т.е. к экономии.

С учетом того, что  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_N$  равна массе жидкости, выгружаемой из СЕ на КНР, расчеты значительно упрощаются и эффективность калибровки значительно увеличивается. Решение этой задачи, являющейся основным преимуществом представленной системы, получается именно за счет специальной конструкции СЕ, так как после истечения в СЕ избыток массы жидкости сливается в побочную емкость и заполняется до уровня кончика вентиля В4, установленного на побоч-





Когда выходной сигнал (показатель) ДПД равен нулю, в этом случае процесс считается завершенным (при  $N$  измерении). На основе этих значений, собранных в компьютерной памяти, система может получить полную таблицу индивидуальной калибровки (ТИК) резервуара, состоящую из массы, объема, высоты, плотности, площади поперечного сечения, соответствующей гидростатическому давлению столба жидкости, что отражает зависимости от его емкости и формы.

Методика составления каждого ТИК оформляется Комитетом стандартизации и метрологии, который является государственным органом, и должна быть принята в качестве юридического документа.

Следует отметить, что при применении этого метода не нужно измерять температуру и плотность ЖТ в резервуаре. На основе высокоточного измерения гидростатического давления ЖТ в нижней части резервуара и в соответствии со значением средней площади поперечного сечения, взятого из ТИК, осуществляется определение массы ЖТ с коммерческой точностью.

На протяжении всего процесса для обеспечения высокой точности измерений в процедуре исследования системы: разрабатывается метод структурно-алгоритмического тестирования и специальный программно-технический комплекс (ПТК) для обеспечения его реализации, а также информационно-программное обеспечение.

Разработан интеллектуальный метод и алгоритм калибровки, позволяющий с высокой точностью измерений гидростатической разницы давления, созданного одновременно известным количеством жидкого топлива как в стандартной емкости, так и в КНР, с помощью одного и того же измерительного устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Государственная система обеспечения единства измерений. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки (ГОСТ 8.346-2000).* – Казань, 2006.
2. *Государственная система обеспечения единства измерений. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические вместимостью 100–50000 м<sup>3</sup>. Методы и средства поверки (ГОСТ 8.380-2000).* – Казань, 2006.
3. *Программа расчета градуировочных таблиц стальных горизонтальных цилиндрических резервуаров (геометрический метод). ГОСТ 8.346-2000. Руководство по эксплуатации.* – Казань, 2006. – 56 с.
4. *Способ градуировки резервуаров.* РФ. Патент №2327118, кл. G01F 25/00, 17/00, опубл. 2006.

5. *Способ* автоматизированного контроля и учета массы нефтепродуктов на топливных базах при их хранении в вертикальных и горизонтальных резервуарах. РФ. Патент №2329472, кл. G01F 1/86, 17/00, опубл. 2006 г.
6. *Гаджиев Ч.М., Исаев М.М.* Методы обработки измерений в ИИС определения массы нефтепродуктов в резервуарах. – Баку: Элм, 2000. – 94 с.
7. *Исаев М.М., Нифтиев Я.М.* Устройство для измерения давлений. Пат. №99/001607, Класс C01L, 19/00, Sənayemülkiyyəti. Rəsmi bülleten. 2001, №1.
8. *Исаев М.М.* Подход к калибровке резервуаров методом измерения гидростатического давления // Известия ВТУЗ. Нефть и газ. Баку. – 1996. – № 1–2. – С. 74–85.
9. *Исаев М.М., Мамедов Р.Г., Агаев Ф.Г., Мехтизаде Э.К.* Структурно-алгоритмические методы повышения точности измерений // «Проблемы нефтегазовой промышленности», Научно-исследовательского института нефтегазовой промышленности НАК «Нефтегаз Украины». – 2010. – Вып. 8. – С. 229–242.
10. *Исаев М.М. и др.* Повышение точности измерений с помощью комбинированных тестовых алгоритмов // Известия НАН Азербайджана. Серия физико-математических и технических наук. – 2009. – Т. XXIX. – № 6. – С. 158–165.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СИСТЕМЫ

*Г.Е. Маркелов*

*Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

В работах [1, 2] изложен единый подход к построению математической модели, которая в достаточной мере обладает нужными свойствами применительно к конкретному исследованию. Некоторые свойства математических моделей сформулированы в работах [3, 4]. В [5] приведен пример построения математической модели, в достаточной мере обладающей нужными свойствами применительно к исследованию, некоторые результаты которого опубликованы в [6–8]. Особенности внедрения такого подхода рассмотрены в [9, 10].

Целью настоящей работы является разработка в рамках единого подхода математической модели электротепловой системы. Электротепловая система представлена на рис. 1 и состоит из резисторов, сопротивление и полная теплоемкость которых зависят от температуры.

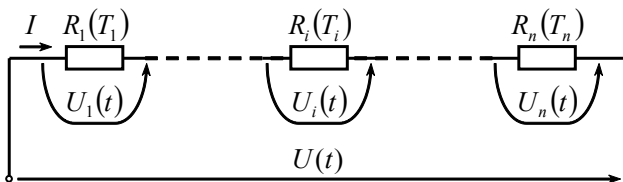


Рис. 1. Последовательное соединение элементов электротепловой системы

Рассмотрим последовательное соединение  $n$  резисторов, сопротивление и полная теплоемкость которых зависят от температуры. Считаем  $i$ -й резистор высокотеплопроводным телом, температура  $T_i$  которого в начальный момент времени  $t_0$  равна  $T_i^0$ . На поверхности резистора площадью  $S_i$  происходит конвективный теплообмен с окружающей

средой, температура которой равна  $T_i^0$ , коэффициент теплоотдачи известен и равен  $\alpha_i$ . Пусть

$$R_i(T_i) = \frac{R_i^0}{1 + \beta_i(T_i - T_i^0)},$$

$$C_i(T_i) = C_i^0(1 + \gamma_i(T_i - T_i^0)),$$

где  $R_i(T_i)$  и  $C_i(T_i)$  – сопротивление и полная теплоемкость  $i$ -го резистора;  $R_i^0$  и  $C_i^0$  – сопротивление и полная теплоемкость  $i$ -го резистора при  $T_i = T_i^0$ ;  $\beta$  и  $\gamma$  – температурные коэффициенты, причем  $\beta > 0$  и  $\gamma > 0$ . Разность электрических потенциалов на полюсах  $i$ -го элемента равна

$$U_i = \frac{U_i^0}{1 + \beta_i(T_i - T_i^0)}, \quad (1)$$

где  $U_i^0 = R_i^0 I$ ;  $I$  – сила постоянного электрического тока, протекающего через резисторы.

Пусть в рамках проводимого исследования представляет интерес разность электрических потенциалов

$$U = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (2)$$

Построим математическую модель объекта исследования, которая в достаточной мере обладает свойствами полноты, точности, адекватности, продуктивности и экономичности.

Для решения поставленной задачи используем полученные в работе [2] результаты, позволяющие легко построить иерархию математических моделей данного объекта исследования и определить условия, при выполнении которых можно с относительной погрешностью не более заданного значения  $\delta_0$  найти искомую величину  $U$ .

Если разности  $T_i - T_i^0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , достаточно малы, то, согласно (1), найдем искомую величину по формуле

$$U_0 = \sum_{i=1}^n U_i^0 = \sum_{i=1}^n R_i^0 I. \quad (3)$$

Определим условия, при которых применима полученная формула. Для этого рассмотрим установившийся процесс теплообмена. В этом случае согласно выкладкам, приведенным в работе [2], установившееся значение величины  $U_i$  найдем по формуле

$$U_i^* = \frac{2U_i^0}{1 + \sqrt{1 + 4\beta_i I U_i^0 / (\alpha_i S_i)}},$$

тогда установившееся значение искомой величины равно

$$U_* = \sum_{i=1}^n U_i^* = \sum_{i=1}^n \frac{2U_i^0}{1 + \sqrt{1 + 4\beta_i I U_i^0 / (\alpha_i S_i)}}. \quad (4)$$

Для относительной погрешности величины  $U_0$  запишем

$$\delta(U_0) = \left| \frac{U - U_0}{U} \right| = \frac{U_0}{U} - 1 \leq \frac{U_0}{U_*} - 1.$$

Следовательно, при выполнении неравенства

$$\frac{U_0}{U_*} - 1 \leq \delta_0 \quad (5)$$

можно с относительной погрешностью не более  $\delta_0$  использовать формулу (3) для нахождения искомой величины.

При выполнении неравенства (5) математическая модель (3) в достаточной мере обладает свойствами полноты, точности, адекватности, продуктивности и экономичности.

Затем определим условия, при которых применима математическая модель (4). Для этого рассмотрим неустановившийся процесс теплообмена. Тогда, согласно результатам, полученным в работе [2], приходим к задаче Коши

$$\begin{aligned} \frac{C_i^0 U_i^0}{\beta_i U_i^2} \frac{dU_i}{dt} &= \frac{\alpha_i S_i U_i^0 - \alpha_i S_i U_i - \beta_i I U_i^2}{\gamma_i U_i^0 - \gamma_i U_i + \beta_i U_i}, \\ U_i(t_0) &= U_i^0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ , и найдем момент времени

$$t_i = t_0 + \frac{C_i^0}{\alpha_i S_i} \left[ \frac{\gamma_i}{\beta_i} \left( \frac{U_i^*}{U_i^0} - 1 + \delta_0 \right) \frac{U_i^0}{U_i^*} + \left( \frac{U_i^0}{2U_i^0 - U_i^*} + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \frac{U_i^0 - U_i^*}{2U_i^0 - U_i^*} \frac{U_i^0}{U_i^*} - 1 \right) \ln \left( 2 - \frac{U_i^*}{U_i^0} - \delta_0 \right) - \left( \frac{U_i^0}{2U_i^0 - U_i^*} + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \frac{U_i^0 - U_i^*}{2U_i^0 - U_i^*} \frac{U_i^0}{U_i^*} \right) \ln \left( \frac{U_i^0}{U_i^0 - U_i^*} \delta_0 \right) \right],$$

для которого  $U_i(t_i) = U_i^*/(1 - \delta_0)$ . При  $t \geq t_i$

$$\delta(U_i^*) = \left| \frac{U_i - U_i^*}{U_i} \right| = 1 - \frac{U_i^*}{U_i} \leq \delta_0,$$

а значение  $U_i^*$  можно с относительной погрешностью не более  $\delta_0$  считать равным  $U_i(t)$ . Пусть  $t_* = \max_{1 \leq i \leq n} t_i$ , тогда легко показать, что при  $t \geq t_*$

$$\delta(U_*) = \left| \frac{U - U_*}{U} \right| = \sum_{i=1}^n (U_i - U_i^*) / \sum_{i=1}^n U_i \leq \delta_0.$$

Следовательно, можно с относительной погрешностью не более  $\delta_0$  использовать формулу (4) для нахождения искомой величины, причем

$$\delta_0 < \frac{U_0}{U_*} - 1,$$

так как в противном случае следует применять формулу (3).

Если не выполнено условие (5), то математическая модель (4) при  $t \geq t_*$  в достаточной мере обладает свойствами полноты, точности, адекватности, продуктивности и экономичности.

Разработка новой математической модели при формировании иерархии математических моделей объекта исследования может привести к уточнению найденных ранее условий применимости построенных математических моделей. Действительно, используя математическую мо-

дель (2), (6), можно уточнить условие применимости формулы (3). Для этого найдем момент времени

$$t_i = t_0 + \frac{C_i^0}{\alpha_i S_i} \left[ \left( \frac{U_i^0}{2U_i^0 - U_i^*} + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \frac{U_i^0 - U_i^*}{2U_i^0 - U_i^*} \frac{U_i^0}{U_i^*} - 1 \right) \ln \left( 1 + \frac{U_i^*}{U_i^0} \delta_0 \right) - \right. \\ \left. - \left( \frac{U_i^0}{2U_i^0 - U_i^*} + \frac{\gamma_i}{\beta_i} \frac{U_i^0 - U_i^*}{2U_i^0 - U_i^*} \frac{U_i^0}{U_i^*} \right) \ln \left( 1 - \frac{U_i^*}{U_i^0 - U_i^*} \delta_0 \right) - \frac{\gamma_i}{\beta_i} \delta_0 \right],$$

для которого  $U_i(t_i) = U_i^0 / (1 + \delta_0)$ . При  $t \leq t_i$

$$\delta(U_i^0) = \left| \frac{U_i - U_i^0}{U_i} \right| = \frac{U_i^0}{U_i} - 1 \leq \delta_0,$$

а значение  $U_i^0$  можно с относительной погрешностью не более  $\delta_0$  считать равным  $U_i(t)$ . Пусть  $t^* = \min_{1 \leq i \leq n} t_i$ , тогда легко показать, что при  $t \leq t^*$

$$\delta(U_0) = \left| \frac{U - U_0}{U} \right| = \sum_{i=1}^n (U_i^0 - U_i) / \sum_{i=1}^n U_i \leq \delta_0.$$

Следовательно, можно с относительной погрешностью не более  $\delta_0$  использовать формулу (3) для нахождения искомой величины.

Если выполнено условие (5) или  $t \leq t^*$ , то математическая модель (3) в достаточной мере обладает свойствами полноты, точности, адекватности, продуктивности и экономичности.

Построение иерархии математических моделей объекта исследования с учетом полученных в работе [2] результатов позволяет выявить математическую модель, которая в достаточной мере обладает нужными свойствами применительно к конкретному исследованию. Действительно, если выполняется неравенство (5) или в рамках проводимого исследования  $t \leq t^*$ , то выбираем математическую модель (3). Если не выполнено условие (5), а временной интервал от  $t_0$  до  $t_*$  можно в рамках проводимого исследования не рассматривать, то выбираем математическую модель (4), иначе – математическую модель (2), (6).



Таким образом, сформулированы утверждения, которые позволяют установить математическую модель электротепловой системы. Построенная в рамках единого подхода модель в достаточной мере обладает свойствами полноты, точности, адекватности, продуктивности и экономичности применительно к данному исследованию. Очевидно, что применение такой математической модели не только сокращает затраты времени и средств на проведение исследования, но и позволяет рационально использовать возможности математического моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Маркелов Г.Е.* О подходе к построению математической модели // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2013): Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием им. А.Ф. Терпугова (29–30 ноября 2013 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. – Ч. 2. – С. 136–141.
2. *Markelov G.E.* Constructing a Working Mathematical Model // Theoretical & Applied Science. – 2015. – № 08. – P. 44–46.
3. *Мышкис А.Д.* Элементы теории математических моделей. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 191 с.
4. *Зарубин В.С.* Математическое моделирование в технике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 495 с.
5. *Маркелов Г.Е.* Особенности построения математических моделей // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – Вып. 4. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/150.html> (дата обращения: 12.02.2017).
6. *Markelov G.E.* Effect of initial heating of the jet-forming layer of shaped-charge liners on the ultimate elongation of jet elements // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2000. – V. 41(2). – P. 231–234.
7. *Markelov G.E.* Effect of initial heating of shaped charge liners on shaped charge penetration // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2000. – V. 41(5). – P. 788–791.
8. *Markelov G.E.* Influence of heating temperature on the ultimate elongation of shaped-charge jet elements // Proc. of the 5th Int. Conf. «Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics». – Novosibirsk: Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, 2000. – P. 170.
9. *Маркелов Г.Е.* Особенности преподавания дисциплины «Математическое моделирование» // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2013): Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием им. А.Ф. Терпугова (29–30 ноября 2013 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. – Ч. 1. – С. 144–147.
10. *Markelov G.E.* Teaching the Basics of Mathematical Modeling. Part 2 // Theoretical & Applied Science. – 2016. – № 01. – P. 72–74.

# ИССЛЕДОВАНИЕ RQ-СИСТЕМЫ ММРР/М/1/1 С ВЫЗЫВАЕМЫМИ ЗАЯВКАМИ АСИМПТОТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*А.А. Назаров, С.В. Пауль*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В настоящее время изучению RQ-систем, которые являются математическими моделям реальных систем call-центров, телекоммуникационных сетей связи, компьютерных сетей, систем в экономике уделяется большое внимание.

Такие системы характеризуются тем, что клиенты (заявки, звонки, сообщения и т.д.) не могут быть обслужены и вынуждены ждать, после чего они вновь обращаются к прибору с целью обслужиться. Как правило, рассматриваются RQ-системы, в которых входящие вызовы либо сразу обслуживаются прибором, либо из-за его занятости уходят на орбиту и уже обращаются за обслуживанием к прибору после случайной задержки [1, 2]. Однако в настоящее время все чаще встречаются ситуации, в которых сервер имеет возможность совершать исходящие запросы [3, 4]. В различных call-центрах операторы принимают входящие звонки, но как только у них возникает свободное время и они находятся в режиме ожидания, они могут осуществлять исходящие вызовы с целью рекламы, продвижения и продажи пакетов товаров и услуг центра.

В предложенной работе основным методом исследования является метод асимптотического анализа, который позволяет в RQ-системе ММРР/М/1/1 с двумя классами заявок найти вид предельного распределения числа заявок в системе в двух асимптотических условиях: в условии высокой интенсивности вызывания заявок и в условии продолжительного обслуживания вызываемых заявок. На основе найденных распределений построены дискретные распределения (будем называть их гауссовской аппроксимацией и гамма-аппроксимацией), которые аппроксимируют дискретное распределение числа заявок в системе. Определены условия применимости полученных аппроксимаций в зависимости от значений параметров системы.

### Математическая модель RQ-системы MMPP/M/1/1 с вызываемыми заявками и постановка задачи

Рассмотрим RQ-систему, на вход которой поступает MMPP-поток заявок. MMPP-поток определяется управляющим процессом  $n(t)$  – цепью Маркова с конечным числом состояний  $n = \overline{1, N}$ , которая задана матрицей инфинитезимальных характеристик  $\mathbf{Q}$  с элементами  $q_{k_1 k_2}$ ; диагональной матрицей  $\Lambda$  условных интенсивностей наступления событий на интервалах постоянства  $\lambda_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Для определения условия существования стационарного режима матрицу  $\Lambda$  зададим в виде  $\Lambda = \rho \mu_1 \Lambda_1 / r \Lambda_1 e$ , где  $\Lambda_1$  – произвольная диагональная матрица с неотрицательными элементами, а условием существования стационарного режима является выполнение неравенств  $0 < \rho < 1$ .

Заявка входящего потока, поступая в систему и обнаруживая прибор свободным, занимает его, а прибор начинает обслуживание в течение экспоненциально-распределенного времени с параметром  $\mu_1$ . Если же заявка, поступая в систему, обнаруживает прибор занятым, она мгновенно уходит на орбиту и осуществляет там случайную задержку в течение экспоненциально-распределенного времени с параметром  $\sigma$ . В момент окончания обслуживания прибор вызывает заявку извне с интенсивностью  $\alpha$ . Вызываемая заявка, обращаясь к прибору, может застать его свободным, тогда она встает на прибор и обслуживается случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_2$ . Если же вызываемая заявка в момент прихода в систему застает прибор занятым обслуживанием заявки входящего потока, то она теряется и в дальнейшем не рассматривается.

Обозначим  $i(t)$  – число заявок в системе в момент времени  $t$ ;  $k(t)$  принимает значения 0, если прибор свободен, 1, если прибор занят обслуживанием заявки входящего потока, 2, если прибор занят обслуживанием вызываемой заявки;  $n(t)$  – управляющая входящим MMPP-поток цепь Маркова, которая определяется матрицей инфинитезимальных характеристик  $\mathbf{Q}$ . Состояния управляющей цепи Маркова  $n(t)$  будем также называть состояниями MMPP-потока. Заданы условные интенсивности наступления событий на интервалах постоянства  $\lambda_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ .

Рассмотрим трехмерный марковский процесс  $\{k(t), n(t), i(t)\}$ , для стационарного распределения вероятностей которого

$$P\{k(t) = k, n(t) = n, i(t) = i\} = P_k(n, i)$$

составим систему Колмогорова. Запишем равенства

$$\begin{cases} -(\lambda_n + i\sigma + \alpha)P_0(n, i) + \mu_1 P_1(n, i+1) + \mu_2 P_2(n, i+1) + \sum_v^N P_0(v, i)q_{vn} = 0, \\ -(\lambda_n + \mu_1)P_1(n, i) + \lambda_n [P_1(n, i-1) + P_0(n, i-1)] + i\sigma P_0(n, i) + \sum_v^N P_1(v, i)q_{vn} = 0, \\ -(\lambda_n + \mu_2)P_2(n, i) + P_0(n, i-1)\alpha + P_2(n, i-1)\lambda_n + \sum_v^N P_2(v, i)q_{vn} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Введем частичные характеристические функции, обозначив  $j = \sqrt{-1}$  :

$$H_0(n, u) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju i} P_0(n, i), \quad H_k(n, u) = \sum_{i=1}^{\infty} e^{ju i} P_k(n, i), \quad k = 1, 2.$$

Эти характеристические функции будут отличаться порядком суммирования, так как при  $k = 1, 2$  в системе обязательно будет хотя бы одна заявка. Систему для характеристических функций запишем в матричном виде, обозначив  $\Lambda = \text{diag}[\lambda_n]$ ,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\mathbf{H}(u) = \{H_k(1, u), H_k(2, u), \dots, H_k(N, u)\}$ ,

$$\mathbf{H}'_k(u) = \left\{ \frac{\partial H_k(1, u)}{\partial u}, \frac{\partial H_k(2, u)}{\partial u}, \dots, \frac{\partial H_k(N, u)}{\partial u} \right\},$$

$$\mathbf{H}_0(u)(\mathbf{Q} - \Lambda - \alpha\mathbf{I}) + j\sigma\mathbf{H}'_0(u) + \mu_1 e^{-ju} \mathbf{H}_1(u) + \mu_2 e^{-ju} \mathbf{H}_2(u) = 0,$$

$$\mathbf{H}_1(u)(\mathbf{Q} + (e^{ju} - 1)\Lambda - \mu_1\mathbf{I}) + \mathbf{H}_0(u)e^{ju}\Lambda - j\sigma\mathbf{H}'_0(u) = 0,$$

$$\mathbf{H}_2(u)(\mathbf{Q} + (e^{ju} - 1)\Lambda - \mu_2\mathbf{I}) + \alpha e^{ju} \mathbf{H}_0(u) = 0. \quad (2)$$

Для удобства вычислений просуммируем уравнения системы (2), полученное уравнение умножим на единичный вектор-столбец  $\mathbf{e}$  и на экспоненту  $e^{ju}$ . Так как  $\mathbf{Q}\mathbf{e} = 0$ , получим скалярное уравнение

$$\mathbf{H}_0(u)(e^{ju}\Lambda + \alpha e^{ju}\mathbf{I})\mathbf{e} + \mathbf{H}_1(u)(e^{ju}\Lambda - \mu_1\mathbf{I})\mathbf{e} + \mathbf{H}_2(u)(e^{ju}\Lambda - \mu_2\mathbf{I})\mathbf{e} = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим систему (2) и уравнение (3), т.е. систему из трех матричных уравнений и одного скалярного:

$$\mathbf{H}_0(u)(\mathbf{Q} - \Lambda - \alpha\mathbf{I}) + j\sigma\mathbf{H}'_0(u) + \mu_1 e^{-ju} \mathbf{H}_1(u) + \mu_2 e^{-ju} \mathbf{H}_2(u) = 0,$$

$$\mathbf{H}_1(u) (\mathbf{Q} + (e^{ju} - 1)\mathbf{\Lambda} - \mu_1 \mathbf{I}) + \mathbf{H}_0(u) e^{ju} \mathbf{\Lambda} - j\sigma \mathbf{H}'_0(u) = 0,$$

$$\mathbf{H}_2(u) (\mathbf{Q} + (e^{ju} - 1)\mathbf{\Lambda} - \mu_2 \mathbf{I}) + \alpha e^{ju} \mathbf{H}_0(u) = 0,$$

$$\mathbf{H}_0(u) (e^{ju} \mathbf{\Lambda} + \alpha e^{ju} \mathbf{I}) \mathbf{e} + \mathbf{H}_1(u) (e^{ju} \mathbf{\Lambda} - \mu_1 \mathbf{I}) \mathbf{e} + \mathbf{H}_2(u) (e^{ju} \mathbf{\Lambda} - \mu_2 \mathbf{I}) \mathbf{e} = 0. \quad (4)$$

Систему (4) будем решать методом асимптотического анализа в двух предельных условиях высокой интенсивности вызывания заявок ( $\alpha \rightarrow \infty$ ) и в условии продолжительного обслуживания вызываемых заявок ( $\mu_2 \rightarrow 0$ ).

Характеристическая функция  $\mathbf{H}(u)$  числа заявок в системе достаточно просто выражается через частичные характеристические функции  $\mathbf{H}_k(u)$  следующими равенствами:

$$H(u) = E e^{ju i(t)} = \{ \mathbf{H}_0(u) + \mathbf{H}_1(u) + \mathbf{H}_2(u) \} \mathbf{e}.$$

### Асимптотический анализ RQ-системы в условии высокой интенсивности вызывания заявок ( $\alpha \rightarrow \infty$ )

#### Асимптотика первого порядка

Систему (4) будем решать методом асимптотического анализа в условии высокой интенсивности вызывания заявок ( $\alpha \rightarrow \infty$ ).

**Теорема 1.** Пусть  $i(t)$  – число заявок в стационарной RQ-системе MMPP/M/1/1 с вызываемыми заявками, тогда

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} E \exp \left( jw \frac{i(t)}{\alpha} \right) = e^{jw \kappa_1}, \quad (5)$$

где  $\kappa_1$  определяется уравнением

$$\mathbf{r} \left\{ \kappa_1 \sigma (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} + (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right\}^{-1} \times \\ \times \left\{ \mathbf{I} + \kappa_1 \sigma (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} (\mathbf{\Lambda} - \mu_1 \mathbf{I}) + (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} (\mathbf{\Lambda} - \mu_2 \mathbf{I}) \right\} \mathbf{e} = 0. \quad (6)$$

Здесь вектор  $\mathbf{r}$  – вектор стационарного распределения состояний цепи Маркова  $n(t)$ , т.е.  $\mathbf{rQ} = 0$ ,  $\mathbf{r}\mathbf{e} = 1$ .

Асимптотика первого порядка определяет лишь асимптотическое среднее значение  $\kappa_1$  числа заявок в системе. Для более детального исследования процесса  $i(t)$  рассмотрим асимптотику второго порядка.

## Асимптотика второго порядка

**Теорема 2.** Пусть  $i(t)$  – число заявок в стационарной RQ-системе ММРР/М/1/1 с вызываемыми заявками, тогда

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} E \exp \left\{ jw \frac{\frac{1}{\alpha} i(t) - \kappa_1}{\sqrt{\alpha}} \right\} = e^{\frac{(jw)^2}{2} \kappa_2}, \quad (7)$$

где  $\kappa_2$  определяется равенством

$$\kappa_2 = \frac{1}{\sigma} \frac{\mathbf{r}_0 \mathbf{e} + \mathbf{r}_1 \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} + \mathbf{r}_2 \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} + [\mathbf{y}_0 + \mathbf{y}_1 (\boldsymbol{\Lambda} - \mu_1 \mathbf{I}) + \mathbf{y}_2 (\boldsymbol{\Lambda} - \mu_2 \mathbf{I})] \mathbf{e}}{[-\mathbf{g}_0 + \mathbf{g}_1 (\mu_1 \mathbf{I} - \boldsymbol{\Lambda}) + \mathbf{g}_2 (\mu_2 \mathbf{I} - \boldsymbol{\Lambda})] \mathbf{e}}. \quad (8)$$

Здесь вектор  $\mathbf{r}_0$  определяется уравнением

$$\mathbf{r}_0 \left\{ \mathbf{I} + \kappa_1 \sigma (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} (\boldsymbol{\Lambda} - \mu_1 \mathbf{I}) + (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} (\boldsymbol{\Lambda} - \mu_2 \mathbf{I}) \right\} \mathbf{e} = 0, \quad (9)$$

а векторы вероятностей  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  – равенствами

$$\mathbf{r}_1 = \kappa_1 \sigma \mathbf{r}_0 (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}, \quad \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_0 (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}, \quad \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}.$$

Векторы  $\mathbf{g}_0, \mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{y}_0, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$  определяются двумя системами уравнений:

$$\mathbf{g}_0 \left[ -\mathbf{I} - \sigma \kappa_1 \mathbf{I} + \mu_2 (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} + \mu_1 \sigma \kappa_1 (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right] = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_0 \mu_1 (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1},$$

$$\mathbf{g}_1 = (\mathbf{g}_0 \sigma \kappa_1 + \mathbf{r}_0) (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1},$$

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{g}_0 (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1},$$

$$(\mathbf{g}_0 + \mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2) \mathbf{e} = 0; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{y}_0 \left[ (-\mathbf{I} - \sigma \kappa_1 \mathbf{I}) + \mu_1 \sigma \kappa_1 (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} + \mu_2 (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right] = \\ & = \mu_1 \mathbf{r}_1 \left[ \mathbf{I} - \boldsymbol{\Lambda} (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right] + \mu_2 \left[ \mathbf{r}_2 - (\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_2 \boldsymbol{\Lambda}) (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \right], \end{aligned}$$

$$\mathbf{y}_1 = (\mathbf{y}_0 \sigma \kappa_1 + \mathbf{r}_1 \boldsymbol{\Lambda}) (\mu_1 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1},$$

$$\mathbf{y}_2 = (\mathbf{y}_0 + \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_2 \boldsymbol{\Lambda}) (\mu_2 \mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1},$$

$$(\mathbf{y}_0 + \mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2) \mathbf{e} = 0. \quad (11)$$

Асимптотика второго порядка, то есть теорема 2, показывает, что асимптотическое при  $\alpha \rightarrow \infty$  распределение вероятностей числа  $i(t)$  заявок в системе является гауссовским с асимптотическим средним  $\kappa_1 \alpha$  и дисперсией  $\kappa_2 \alpha$ , что позволяет для допредельного распределения

$$P(i) = P_0(i) + P_1(i) + P_2(i), \quad i \geq 0 \quad (12)$$

построить аппроксимацию, в частности аппроксимацию  $P^{(2)}(i)$  вида

$$P^{(2)}(i) = (L(i + 0,5) - L(i - 0,5))(1 - L(-0,5))^{-1}, \quad (13)$$

где  $L(x)$  – функция нормального распределения с параметрами  $\kappa_1 \alpha$  и  $\kappa_2 \alpha$ .

### Асимптотический анализ RQ-системы в условии продолжительного обслуживания вызываемых заявок ( $\mu_2 \rightarrow 0$ )

**Теорема 3.** Пусть  $i(t)$  – число заявок в стационарной RQ-системе MMPP/M/1/1 с вызываемыми заявками, тогда характеристическая функция числа заявок в системе имеет вид

$$H(u) = \lim_{\mu_2 \rightarrow 0} E e^{ju\mu_2 i(t)} = \left( 1 - j \frac{\rho \mu_1}{\mu_2} u \right)^{-\left( \frac{\alpha}{\sigma(1-\rho)} + 1 \right)}. \quad (14)$$

Теорема 3 показывает, что асимптотическое при  $\mu_2 \rightarrow 0$  распределение вероятностей числа заявок в системе имеет гамма-распределение.

### Точность аппроксимации $P^{(2)}(i)$ и область ее применения

Точность аппроксимации  $P^{(2)}(i)$  будем определять расстоянием Колмогорова  $\Delta_2 = \max_{0 \leq i \leq N} \left| \sum_{v=0}^i (P(v) - P^{(2)}(v)) \right|$  между распределениями  $P(i)$  и  $P^{(2)}(i)$ , где распределение  $P(i)$  определяется реализацией численного алгоритма, а аппроксимация  $P^{(2)}(i)$  построена на основе гауссовской и гамма-аппроксимаций. Управляющий MMPP-поток марковский процесс  $n(t)$  задан матрицей интенсивностей переходов и матрицей  $\Lambda_1$ :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -0.6 & 0.3 & 0.3 \\ 0.4 & -1 & 0.6 \\ 0.1 & 0.2 & -0.3 \end{bmatrix}, \quad \Lambda_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}.$$

Определим матрицу  $\Lambda$  в виде  $\Lambda = \rho \mu_1 \Lambda_1 / r \Lambda_1 \mathbf{e}$ , где параметр  $\rho$  имеет смысл загрузки системы.

Табл. 1 содержит значения величины  $\Delta_2$  в зависимости от значений величины загрузки  $\rho$  и интенсивности вызывания заявок  $\alpha$ , табл. 2 – в зависимости от значений величины загрузки  $\rho$  и интенсивности обслуживания вызываемых заявок  $\mu_2$  в рассматриваемой системе. Из табл. 1 видно, что точность аппроксимации растет с увеличением параметра  $\alpha$  и величины загрузки  $\rho$ , а из табл. 2 – что точность аппроксимации растет с уменьшением параметра  $\mu_2$  и уменьшается с увеличением величины  $\rho$ . На рис. 1 пунктирной линией изображена плотность распределения вероятностей числа заявок в системе, полученная асимптотическим методом, сплошной линией – полученная численно.

Т а б л и ц а 1

Расстояние Колмогорова  $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2, \sigma = 1$ 

$\rho$	$\alpha = 350$	$\alpha = 500$	$\alpha = 600$	$\alpha = 800$	$\alpha = 1000$
0,2	0,054	0,045	0,041	0,036	0,032
0,4	0,041	0,034	0,029	–	–

Т а б л и ц а 2

Расстояние Колмогорова  $\mu_1 = 1, \alpha = 1, \sigma = 1$ 

$\rho$	$\mu_2 = 0,07$	$\mu_2 = 0,05$	$\mu_2 = 0,04$	$\mu_2 = 0,035$
0,5	0,05	0,036	0,029	0,026
0,6	0,058	0,042	0,034	0,030

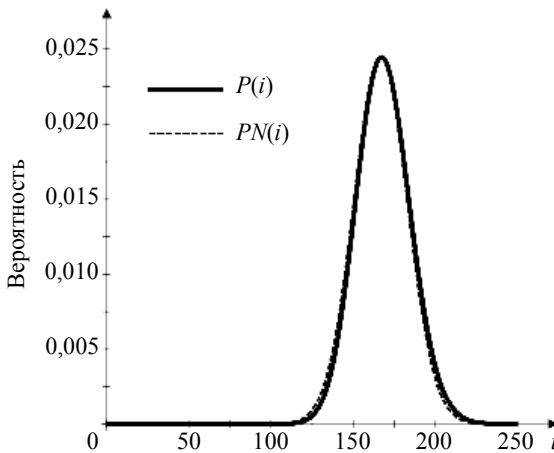


Рис. 2. Асимптотическое и численное распределение вероятностей:  $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2, \sigma = 1, \rho = 0,4, \alpha = 500, \Delta_2 = 0,034$



### Заключение

В предложенной работе мы рассмотрели RQ-систему MMPP/1/1 с вызываемыми заявками. Были найдены асимптотики первого и второго порядков числа заявок в системе в асимптотическом условии высокой интенсивности вызова заявок. На основе полученных асимптотик была построена гауссовская аппроксимация распределения вероятностей числа заявок в системе. Численные результаты показывают, что точность гауссовской аппроксимации растет с ростом параметра  $\alpha$ . Была получена гамма-аппроксимация числа заявок в системе в асимптотическом условии продолжительного обслуживания заявок. Из численных примеров видно, что точность гамма-аппроксимации растет с уменьшением  $\mu_2$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Artalejo J.R. and Gomez-Corral A.* Retrial queueing systems: a computational approach. – Springer, 2008.
2. *Falin G.I. and Templeton J.G.C.* Retrial Queues. – London: Chapman and Hall, 1997.
3. *Deslauriers A., L'Ecuyer P., Pichitlamken J., et al.* Markov chain models of a telephone call center with call blending // *Computers and Operations Research.* – 2007. – V. 34. – P. 1616–1645.
4. *Nazarov A., Paul S., and Gudkova I.* Asymptotic Analysis of Markovian Retrial Queue with Two-Way Communication under Low Rate of Retrials Condition // *Proceedings 31st European Conference on Modelling and Simulation, ECMS.* – Budapest, 2017. – P. 687–693.

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОДНОСЕКТОРНОЙ ЭКОНОМИКОЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ ФОНДОВООРУЖЁННОСТИ ТРУДА

*Ю.И. Параев, Т.И. Грекова, К.О. Полуэктова*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проблема управления односекторной экономикой восходит к [1]. В последующем в ряде работ рассматривалась задача оптимального управления такой экономикой. Полное решение этой задачи с помощью принципа максимума Понтрягина получено в [2]. В настоящей работе рассматривается задача оптимального управления односекторной экономикой при случайном изменении фондовооружённости труда.

## 1. Постановка задачи

Состояние экономики характеризуется двумя величинами [2]:  $k$  – фондовооружённость труда и  $c$  – непроизводственное потребление, приходящиеся на одного работника, а также функцией  $F(k)$  – валовым продуктом, произведенным в единицу времени. В детерминированном случае эти переменные удовлетворяют уравнениям

$$\dot{k} = uF - \mu k, \quad k(0) = k_0; \quad (1)$$

$$\dot{c} = \delta c + (1-u)F, \quad c(0) = 0, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент амортизации;  $\delta$  – норма дисконтирования ( $\mu \geq 0$ ,  $\delta \geq 0$ );  $uF$  – часть продукта, которая идет на увеличение основного капитала,  $(1-u)F$  – часть продукта, которая идет на увеличение непроизводственного потребления. Таким образом, в задаче управляющим параметром является коэффициент  $u$ , который должен удовлетворять условию

$$0 \leq u \leq 1. \quad (3)$$

Далее используется производственная функция Кобба – Дугласа, т.е.  $F(k) = Ak^\alpha$ , где  $A$  – масштаб темпа производства ( $A > 0$ );  $\alpha$  – коэффициент эластичности по основным фондам. Согласно (2), общее непроизводственное потребление на интервале  $[t_1, t_2]$  при заданном управлении  $u$  равно

$$J[u; t_1, t_2] = \int_{t_1}^{t_2} e^{\delta(T-t)} (1-u)F(k)dt.$$

Предполагается, что планируемый период производства  $[0, T]$  задан и конечен.

*Детерминированная задача:* в течение интервала времени  $[0, T]$  найти такое управление  $u(t)$  с учетом (3), при котором функционал

$$c(T) = J[u; 0, T] = \int_0^T e^{\delta(T-t)} (1-u)F(k)dt \quad (4)$$

максимален. Эта задача с помощью принципа максимума Понтрягина подробно решена в [2].

В [3] предложено учет случайных воздействий на фондовооружённость труда представить в виде уравнения

$$\dot{k} = uF - \mu k + \sigma k \xi(t), \quad k(0) = k_0, \quad (5)$$

где  $\xi(t)$  – стандартный белый гауссовский шум (или  $\xi(t) = d\omega(t)/dt$ , где  $\omega(t)$  – винеровский процесс);  $\sigma$  – коэффициент волатильности. Таким образом, процесс  $k(t)$  становится случайным. Однако этот процесс измеряется, т.е. в каждый момент времени  $t$  значение  $k(t)$  известно.

*Стохастическая задача:* в течение интервала времени  $[0, T]$  найти такое управление  $u(t)$  для (2) и (5) с учетом (3), при котором среднее значение функционала (4) максимально.

Эта задача с помощью принципа максимума Понтрягина не решается, но может быть решена с помощью динамического программирования [4].

## 2. Решение стохастической задачи

Согласно методу динамического программирования, введем функцию Беллмана

$$s(k; t, T) = \max_{u[t, T]} M \left\{ \int_t^T e^{\delta(T-t)} (1-u)F(k)dt | k, t \right\}$$

– среднее значение величины  $c(T)$  при условии, что процесс продолжается на интервале времени  $[t, T]$  с начальным условием  $k(t) = k$ , и на этом интервале применяется оптимальное управление. Для данной функции можно записать уравнение Беллмана

$$\begin{aligned} \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial t} &= \max_{0 \leq u(t) \leq 1} \left\{ \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} (uF(k) - \mu k) + e^{\delta(T-t)} (1-u)F(k) + \rho k^2 \frac{\partial^2 s(k;t,T)}{\partial k^2} \right\} = \\ &= \max_{0 \leq u(t) \leq 1} \left\{ uF(k) \left( \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} - e^{\delta(T-t)} \right) - \mu k \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} + e^{\delta(T-t)} F(k) + \rho k^2 \frac{\partial^2 s(k;t,T)}{\partial k^2} \right\}, \\ s(k;T,T) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\rho = 1/2 \sigma^2$  и  $k$  – просто аргумент функции. Максимум правой части этого уравнения по  $u$  с учетом (3) достигается при

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} > e^{\delta(T-t)}, \\ u_{\text{ос}}, & \text{если } \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} = e^{\delta(T-t)}, \\ 0, & \text{если } \frac{\partial s(k;t,T)}{\partial k} < e^{\delta(T-t)}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $u_{\text{ос}}$  – особое управление, которое будет определено ниже.

Можно допустить, что если коэффициент  $\sigma$  мал, то решение стохастической задачи будет близко к решению детерминированной задачи.

При решении детерминированной задачи [2] интервал  $[0, T]$  точками  $t_1$  и  $t_2$  ( $0 < t_1 < t_2 < T$ ) разбивается на три интервала:  $[0, t_1]$ ,  $[t_1, t_2]$  и  $[t_2, T]$ . Интервал  $[0, t_1]$  соответствует выходу на магистраль, интервал  $[t_1, t_2]$  – магистрали (если она существует), интервал  $[t_2, T]$  – заключительному этапу (сходу с магистрали). На магистрали  $k = k_{\text{ос}} = \text{const}$ , причем

$$k_{\text{ос}}^{1-\alpha} = \frac{\alpha A}{\delta + \mu} \quad \text{и} \quad u_{\text{ос}} = \frac{\mu k}{F}. \quad (8)$$

Далее рассматривается основной вариант, когда  $k(0) < k_{\text{ос}}$  и на интервале  $[0, t_1]$   $u = 1$ . На заключительном интервале  $[t_2, T]$   $u = 0$ . Предполагается, что период производства  $[0, T]$  достаточно велик. Таким образом, структура оптимального управления имеет вид

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < t < t_1, \\ u_{\text{ос}} & \text{при } t_1 < t < t_2, \\ 0 & \text{при } t_2 < t < T. \end{cases} \quad (9)$$

Фактически получается, что решение детерминированной задачи сводится к нахождению значений  $t_1$  и  $t_2$ .

Можно предположить, что в стохастическом случае при достаточно малом коэффициенте  $\sigma$  структура оптимального управления имеет такой же вид. Решение уравнения (6) начнем с правого конца. Обозначим через  $s_1(k; t, \cdot)$ ,  $s_2(k; t, \cdot)$ ,  $s_3(k; t, \cdot)$  функции Беллмана, если момент  $t$  относится к интервалам  $[0, t_1]$ ,  $[t_1, t_2]$ ,  $[t_2, T]$  соответственно.

### 3. Сход с магистрали

На интервале  $[t_2, T]$   $u = 0$ . Поэтому уравнение (6) принимает вид

$$-\frac{\partial s_3(k; t, T)}{\partial t} = -\mu k \frac{\partial s_3(k; t, T)}{\partial k} + e^{\delta(T-t)} F(k) + \rho k^2 \frac{\partial^2 s_3(k; t, T)}{\partial k^2}. \quad (10)$$

Его решение можно записать в виде

$$s_3(k; t, T) = F(k)w_3(t, T), \quad (11)$$

где  $w_3(t, T)$  – искомая функция. Подставляя (11) в (10), получаем

$$-F(k)\dot{w}_3(t, T) = -\mu k F'(k)w_3(t, T) + \rho k^2 F''(k)w_3(t, T) + F(k)e^{\delta(T-t)}$$

или

$$-F(k)\dot{w}_3(t, T) = -\alpha \mu F(k)w_3(t, T) + \rho \alpha (\alpha - 1) F(k)w_3(t, T) + F(k)e^{\delta(T-t)}.$$

Сократив на  $F(k)$ , получаем

$$-\dot{w}_3(t, T) = -\vartheta w_3(t, T) + e^{\delta(T-t)}, \quad w_3(T, T) = 0,$$

где  $\vartheta = \alpha \mu + \rho \alpha (1 - \alpha)$ . Решение этого уравнения равно

$$w_3(t, T) = \frac{e^{\delta(T-t)} - e^{-\vartheta(T-t)}}{\delta + \vartheta}. \quad (12)$$

### 4. Магистраль

Согласно (7), на интервале  $[t_1, t_2]$  должно выполняться условие

$$\frac{\partial s_2(k; t, T)}{\partial k} \equiv e^{\delta(T-t)} \quad (13)$$

и, следовательно, условие

$$\frac{\partial^2 s_2(k; t, T)}{\partial k^2} \equiv 0.$$

Поэтому уравнение (6) принимает вид

$$-\frac{\partial s_2(k; t, t_2)}{\partial t} = -\mu k \frac{\partial s_2(k; t, t_2)}{\partial k} + e^{\delta(T-t)} F(k), \quad s_2(k; t_2, t_2) = s_3(k; t_2, T). \quad (14)$$

Согласно методу разделения переменных, его решение ищем в виде

$$s_2(k; t, t_2) = H(k)e^{\delta(T-t)} + B, \quad (15)$$

где  $H(k)$  – искомая функция;  $B$  – какая-то константа. Подставляя (15) в (14) и сокращая на  $e^{\delta(T-t)}$ , получаем дифференциальное уравнение первого порядка

$$\mu k H'(k) + \delta H(k) = F(k). \quad (16)$$

Его решение состоит из общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения, что приводит к выражению

$$H(k) = Ck^{-\frac{\delta}{\mu}} + \frac{Ak^\alpha}{\alpha\mu + \delta},$$

где константа  $C$  находится из условия (13) или условия  $H' = 1$ . В результате получается

$$H(k) = \frac{F - \mu k}{\delta}. \quad (17)$$

Далее, еще раз используя условие (13), получаем, что на магистрали выполняются соотношения (8). Таким образом, свойства магистрали в детерминированном и стохастическом случаях совпадают.

Константа  $B$  в (15) находится из условия  $s_2(k; t_2, t_2) = s_3(k; t_2, T)$ . При этом оказывается, что она зависит от параметра  $t_2$ . Естественно этот параметр выбирать так, чтобы функция  $s_2(k; t, T)$  достигала максимум. В результате получается

$$T - t_2 = \frac{1}{\delta + \vartheta} \ln \left( \frac{\alpha F}{\alpha F - (\delta + \vartheta) k_{oc}} \right).$$

## 5. Выход на магистраль

Здесь  $u = 1$ . Поэтому производственное потребление на интервале  $[0, t_1]$  равно нулю и поэтому  $s_1(k; t, t_1) \equiv s_2(k(t_1); t_1, T) = \text{const}$ . С другой стороны, уравнение Беллмана (6) можно решать методом характери-

стик. В результате получается, что переменная  $k$  удовлетворяет уравнению (1), решение которого на интервале  $[t_0, t)$  с начальным условием  $k(t_0) = k_0$  имеет вид

$$k^\beta(t) = \frac{A}{\mu} (1 - e^{-\beta\mu(t-t_0)}) + k_0^\beta e^{-\beta\mu(t-t_0)}, \quad (18)$$

где  $\beta = 1 - \alpha$ . Момент времени  $t_1$  определяется из условия  $k(t_1) = k_{oc}$ , что приводит к выражению

$$t_1 = \frac{1}{\mu\beta} \ln \left( \frac{A - \mu k_0^\beta}{A - \mu k_{oc}^\beta} \right). \quad (19)$$

В результате исследования получено, что структура управления решения детерминированной и стохастической задач совпадают и определяются значениями моментов  $t_1$  и  $t_2$ . При этом стохастическая составляющая влияет только на момент  $t_2$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Интрилигатор М.* Математические методы оптимизации и экономическая теория. – М.: Прогресс, 1975. – 286 с.
2. *Параев Ю.И., Грекова Т.И., Данилюк Е.Ю.* Аналитическое решение задачи оптимального управления односекторной экономикой на конечном интервале времени // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 4(17). – С. 5 – 15.
3. *Соловьев В.И.* Стохастические методы в экономике и финансах. – М.: ГУУ, 2000. – 154 с.
4. *Параев Ю.И.* Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации. – М.: Сов. радио, 1976. – 184 с.

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ ДВУХСЕКТОРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКОНОМИКИ

*К.О. Полуэктова, Т.И. Грекова*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В данной работе рассматривается задача оптимального распределения ресурсов для двухсекторной стохастической модели экономики с целью максимизации благосостояния населения. Задачи оптимального управления, включающие стохастическую компоненту, рассматривались многими авторами, в различных постановках [1–3]. Особенностью рассматриваемой в данной работе задачи является наличие стохастической компоненты в обоих секторах экономики.

Рассматривается модель, в которой экономика представлена двумя секторами: сектором производства средств производства и сектором производства потребительских благ. В качестве ресурсов используются капитал и труд.

Предполагается, что динамика трудовых ресурсов представлена стохастическим диффузионным процессом.

Задача решается как задача оптимального управления с применением принципа максимума Понтрягина

## 1. Постановка задачи

Рассматривается задача оптимального распределения ресурсов на конечном интервале времени  $[0, T]$ . Предполагается, что общий выпуск  $Y(t)$  определяется в соответствии с выражением

$$Y(t) = Y_1(t) + Y_2(t), \quad (1.1)$$

где выпуск каждого из секторов  $Y_i(t), i = 1, 2$  в момент времени  $t$  происходит в соответствии с производственными функциями неоклассического типа  $F_i(K_i, L_i), i = 1, 2$ , при этом  $K_i(t)$  – основные фонды  $i$ -го сектора,  $L_i(t)$  – трудовые ресурсы  $i$ -го сектора,  $i = 1, 2$ .



Выпуск первого сектора  $Y_1(t)$  распределяется между первым и вторым секторами в соответствии с нормой распределения основных средств  $s$  в соответствии с выражением

$$Y_1(t) = sY_1(t) + (1-s)Y_1(t) = sF_1(K_1(t), L_1(t)) + (1-s)F_1(K_1(t), L_1(t)), \quad (1.2)$$

где  $0 \leq s \leq 1$ .

Выпуск второго сектора  $Y_2(t)$  полностью направляется на производственное потребление  $C(t)$ :

$$C(t) = Y_2(t) = F_2(K_2(t), L_2(t)). \quad (1.3)$$

Трудовые ресурсы  $L_i(t)$ ,  $i=1,2$ , задействованные в каждом из секторов, изменяются следующим образом:

$$dL_i(t) = nL_i(t)dt + \sigma_i L_i(t)dZ(t), \quad i=1,2, \quad (1.4)$$

где  $n$  – темп изменения трудовых ресурсов,  $\sigma_i$ ,  $i=1,2$  – параметры вариации трудовых ресурсов каждого из секторов;  $Z(t)$  – стандартный винеровский процесс.

Общие трудовые ресурсы

$$L(t) = L_1(t) + L_2(t). \quad (1.5)$$

Трудовые ресурсы перераспределяются между секторами в соответствии с нормой распределения трудовых ресурсов  $q$ :

$$L_1(t) = qL(t), \quad L_2(t) = (1-q)L(t). \quad (1.6)$$

Изменение во времени основных фондов секторов

$$\dot{K}_1(t) = sF_1(K_1(t), L_1(t)) - \mu K_1(t); \quad (1.7)$$

$$\dot{K}_2(t) = (1-s)F_1(K_1(t), L_1(t)) - \mu K_2(t), \quad (1.8)$$

где  $\mu$  – одинаковая для обоих секторов норма амортизации основных фондов.

Величины капитала первого и второго секторов в начальном момент времени известны  $K_1(0) = K_1^0$ ,  $K_2(0) = K_2^0$ . Величины капитала секторов в момент времени  $T$ , в силу случайности изменения трудовых ресурсов, являются ожидаемыми, т.е.  $K_1^T = E\{K_1(T)\}$ ,  $K_2^T = E\{K_2(T)\}$ .

Основная цель – максимизировать непроемственное потребление на интервале времени  $[0, T]$ , т.е.

$$J = E \left\{ \int_0^T C(t) e^{-\delta t} dt \right\} \xrightarrow{s, q} \max, \quad (1.9)$$

где  $\delta$  – коэффициент дисконтирования.

Таким образом, задача имеет следующий вид: требуется найти такую норму распределения основных средств  $0 \leq s \leq 1$  и норму распределения трудовых ресурсов  $0 \leq q \leq 1$ , чтобы (1.9) достигала максимального значения.

Задача решается в удельных переменных:

$$k_i(t) = \frac{K_i(t)}{L_i(t)}, i = 1, 2,$$

– фондовооруженность  $i$ -го сектора,

$$c(t) = \frac{C(t)}{L(t)} = \frac{F_2(K_2(t), L_2(t))}{L_2(t)} (1 - q) = (1 - q) f_2(k_2)$$

– объем непроемственного потребления, приходящийся на единицу трудовых ресурсов,

$$y_i(t) = \frac{Y_i(t)}{L_i(t)} = F_i \left( \frac{K_i(t)}{L_i(t)}, 1 \right) = f_i \left( \frac{K_i(t)}{L_i(t)} \right) = f_i(k_i(t)), i = 1, 2,$$

– объем выпуска, приходящийся на единицу трудовых ресурсов.

Применяя лемму Ито, получаем изменение во времени фондовооруженности каждого сектора

$$dk_1(t) = \left[ s f_1(k_1(t)) - (\mu + n - \sigma_1^2) k_1(t) \right] dt - \sigma_1 k_1(t) dZ(t); \quad (1.10)$$

$$dk_2(t) = \left[ \frac{q(1-s)}{(1-q)} f_1(k_1(t)) - (\mu + n - \sigma_2^2) k_2(t) \right] dt - \sigma_2 k_2(t) dZ(t) \quad (1.11)$$

с граничными условиями

$$k_1(0) = k_1^0, k_2(0) = k_2^0, k_1^T = E \{ k_1(T) \}, k_2^T = E \{ k_2(T) \}, \quad (1.12)$$

$k_1^T \geq 0, k_2^T \geq 0$  – условие «экономического горизонта».

Целевой функционал для задачи в удельных переменных имеет вид

$$J = E \left\{ \int_0^T c(t) e^{-\delta t} dt \right\} = E \left\{ \int_0^T (1 - q(t)) f_2(k_2(t)) e^{-\delta t} dt \right\}. \quad (1.13)$$

Таким образом, задача принимает следующий вид: требуется найти такие значения нормы распределения основных средств  $0 < s(t) < 1$  и нормы распределения трудовых ресурсов  $0 < q(t) < 1$ , которые при ограничениях (1.10) – (1.12) доставляли бы максимум функционалу (1.13).

## 2. Применение принципа максимума Понтрягина

Задача решается на стационарных траекториях как задача оптимального управления с применением принципа максимума Понтрягина.

Функция Гамильтона, которая определяется как сумма подынтегральной функции целевого функционала (1.13) и скалярного произведения вектора сопряженных переменных и вектора функций, определяющих изменение фондовооруженностей во времени (1.10) – (1.11), имеет вид

$$E_t \{H(\cdot)\} = E_t \left\{ (1 - q) f_2 e^{-\delta t} + \psi_1 \left( s f_1 - (n + \mu - \sigma_1^2) k_1 - \frac{1}{2} \sigma_1^2 k_1^2 \right) + \right. \\ \left. + \psi_2 \left( \frac{(1 - s)q}{(1 - q)} f_1 - (n + \mu - \sigma_2^2) k_2 - \frac{1}{2} \sigma_2^2 k_2^2 \right) \right\}, \quad (2.1)$$

где  $\psi_i(t) \geq 0, i = 1, 2$ , – сопряженные переменные, для которых выполняются условия трансверсальности:

$$E_t \{ \psi_1(T) (k_1(T) - k_1^T) \} = 0; \quad (2.2)$$

$$E_t \{ \psi_2(T) (k_2(T) - k_2^T) \} = 0. \quad (2.3)$$

После замены переменных  $p_i(t) = e^{\delta t} \psi_i, i = 1, 2$ , гамильтониан принимает следующий вид:

$$E_t \{H(\cdot)\} = E_t \left\{ (1 - q) f_2 + p_1 \left( s f_1 - (n + \mu - \sigma_1^2) k_1 - \frac{1}{2} \sigma_1^2 k_1^2 \right) + \right. \\ \left. + p_2 \left( \frac{(1 - s)q}{(1 - q)} f_1 - (n + \mu - \sigma_2^2) k_2 - \frac{1}{2} \sigma_2^2 k_2^2 \right) \right\}.$$

Здесь для сопряженных переменных можно записать

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = E_t \left\{ -p_1 \left( sf_1'(k_1) - (n + \mu - \sigma_1^2) - \sigma_1^2 k_1 \right) - p_2 \frac{(1-s)q}{(1-q)} f_1'(k_1) \right\},$$

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = E_t \left\{ -(1-q)f_2'(k_2) - p_2 \left( (n + \mu - \sigma_2^2) - \sigma_2^2 k_2 \right) \right\},$$

где  $f_1'(k_1)$ ,  $f_2'(k_2)$  – производные функций  $f_1(k_1)$ ,  $f_2(k_2)$  соответственно.

Из функции Гамильтона с учетом свойств производственной функции неоклассического типа получаем, что для управляющего параметра  $s(t)$ , который определяет распределение основных средств между первым и вторым секторами, справедливо следующее равенство:

$$s(t) = \arg \max_{s(t), q(t)} E_t \left\{ p_1(t) sf_1(k_1) - p_2(t) \frac{sq}{(1-q)} f_1(k_1) \right\}. \quad (2.4)$$

Таким образом, из (2.4) получаем трехуровневое релейное управление

$$s(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } E_t \{ p_1(t) \} > E_t \left\{ p_2(t) \frac{q}{(1-q)} \right\}, \\ 0, & \text{если } E_t \{ p_1(t) \} < E_t \left\{ p_2(t) \frac{q}{(1-q)} \right\}, \\ 0 < s^*(t) < 1, & \text{если } E_t \{ p_1(t) \} = E_t \left\{ p_2(t) \frac{q}{(1-q)} \right\}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Задача оптимального распределения ресурсов решается на стационарных траекториях, что означает

$$dk_1(t) = 0, dk_2(t) = 0, dp_1(t) = 0, dp_2(t) = 0.$$

Учитывая (1.12), получаем систему уравнений, из которой определяются значения фондовооруженностей, нормы распределения основных средств и нормы распределения трудовых ресурсов:

$$s \cdot f_1(E\{k_1(t)\}) - (\mu + n - \sigma_1^2) E\{k_1(t)\} = 0; \quad (2.6)$$

$$\frac{q \cdot (1-s)}{(1-q)} f_1(E\{k_1(t)\}) - (\mu + n - \sigma_2^2) E\{k_2(t)\} = 0; \quad (2.7)$$

$$E_t \left\{ -p_1 \left( s f_1'(k_1) - (n + \mu - \sigma_1^2) - \sigma_1^2 k_1 \right) - p_2 \frac{(1-s)q}{(1-q)} f_1'(k_1) \right\} = 0; \quad (2.8)$$

$$E_t \left\{ -(1-q) f_2'(k_2) - p_2 \left( (n + \mu - \sigma_1^2) - \sigma_2^2 k_2 \right) \right\} = 0. \quad (2.9)$$

где  $p_i(t) \geq 0, i = 1, 2$  – сопряженные переменные.

Будем называть магистралью траекторию экономического роста, для которой выполняется  $E\{k_1(t)\} = \bar{k}_1 = \text{const}$ ,  $E\{k_2(t)\} = \bar{k}_2 = \text{const}$ ,  $E\{p_1(t)\} = \bar{p}_1 = \text{const}$ ,  $E\{p_2(t)\} = \bar{p}_2 = \text{const}$ , при этом  $E_t\{p_1(t)\} = E_t \left\{ p_2(t) \frac{q}{(1-q)} \right\}$ ,  $s(t) = s^*$ .

Тогда уравнения (2.6) – (2.9) на магистрали принимают вид

$$s \cdot f_1(\bar{k}_1) - (\mu + n - \sigma_1^2) \bar{k}_1 = 0; \quad (2.10)$$

$$\frac{q \cdot (1-s)}{(1-q)} \cdot f_1(\bar{k}_1) - (\mu + n - \sigma_2^2) \bar{k}_2 = 0; \quad (2.11)$$

$$-\bar{p}_1 \left( s f_1'(\bar{k}_1) - (n + \mu - \sigma_1^2) - \sigma_1^2 \bar{k}_1 \right) - \bar{p}_2 \frac{(1-s)q}{(1-q)} f_1'(\bar{k}_1) = 0; \quad (2.12)$$

$$-(1-q) f_2'(\bar{k}_2) - \bar{p}_2 \left( (n + \mu - \sigma_1^2) - \sigma_2^2 \bar{k}_2 \right) = 0. \quad (2.13)$$

Из уравнений (2.12) – (2.13) получаем оптимальные значения фондвооруженностей первого и второго секторов  $\bar{k}_1^* = \text{const}$ ,  $\bar{k}_2^* = \text{const}$  соответственно.

Из уравнения (2.10) получаем значение нормы распределения основных средств

$$s = \frac{(\mu + n - \sigma_1^2) \bar{k}_1}{f_1(\bar{k}_1)}, \quad (2.14)$$

из (2.11) – значение нормы распределения трудовых ресурсов

$$q = \frac{(\mu + n - \sigma_2^2) \bar{k}_2}{(1-s) f_1(\bar{k}_1) + (\mu + n - \sigma_2^2) \bar{k}_2}. \quad (2.15)$$

С учетом полученных оптимальных значений фондовооруженностей  $\bar{k}_1^*$ ,  $\bar{k}_2^*$  выражения (2.14) – (2.15) принимают следующий вид:

$$s^* = \frac{(\mu + n - \sigma_1^2) \bar{k}_1^*}{f_1(\bar{k}_1^*)}; \quad (2.16)$$

$$q^* = \frac{(\mu + n - \sigma_2^2) \bar{k}_2^*}{(1 - s^*) f_1(\bar{k}_1^*) + (\mu + n - \sigma_2^2) \bar{k}_2^*}. \quad (2.17)$$

Таким образом, оптимальные значения  $\bar{k}_1^*$ ,  $\bar{k}_2^*$ ,  $s^*$ ,  $q^*$  являются решением задачи оптимального распределения ресурсов для двухсекторной стохастической модели экономики.

### Заключение

В данной работе представлено решение задачи оптимального распределения ресурсов для двухсекторной модели рыночной экономики при стохастической динамике трудовых ресурсов на конечном интервале времени с целью максимизации благосостояния населения.

Получено трехуровневое релейное управление для нормы распределения основных средств  $s(t)$ , формулы для расчета оптимальных значений нормы распределения трудовых ресурсов и нормы распределения основных средств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Merton R.C. An asymptotic theory of growth under uncertainty // Review of Economic Studies. – 1975. – V. 42. – P. 375–393.
2. Rico-Ramirez V. and Diwekar U.M. Stochastic maximum principle for optimal control under uncertainty // Computers and Chemical Engineering – 2004. – No. 28. – P. 2845–2849.
3. Грекова Т.И., Роцин А.В. Оптимальное управление для модели односекторной экономики со стохастической динамикой трудовых ресурсов // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016): материалы XV Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (12–16 сентября 2016 г.). – 2016. – Ч. 2. – С. 13–18.

# АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОСТАВКАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СКИДОК

*Г.Н. Решетникова, Т.Е. Малахова*

*Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Конкуренция на рынке товаров и услуг заставляет предпринимателей разрабатывать все новые формы работы с покупателем. В последнее время большую популярность приобрела торговля при использовании скидок [1].

Скидка – это сумма, на которую продавец снижает цену продажи товара с целью расширения рынка сбыта и увеличения объемов продаж, что приводит к увеличению прибыли. Существует множество типов скидок: на один день, по дням недели, на любой срок, сезонная скидка и т.д. При этом скидки могут быть как однодневными, так и многодневными. Они могут устанавливаться различными способами: через постоянные промежутки времени и автоматически при выполнении некоторого критерия.

## **1. Построение математической модели для управления поставками при использовании скидок**

Математическая модель для управления поставками задается в виде системы обыкновенных дифференциальных стохастических уравнений [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \bar{\mathbf{A}}(t)\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}(t)\mathbf{u}(t) + \bar{\mathbf{F}}(t)\mathbf{q}(t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \\ \dot{u}(t) &= \omega(t), \quad u(t_0) = u_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}(t) = (z(t), v(t), w(t))^T$  – вектор состояния, который характеризует объем товара на складе, у потребителя и доход в рыночных ценах;  $u(t)$  – объем поставляемого товара в закупочных ценах;  $\omega(t)$  – управление, задающее изменение объема поставок; вектор  $\mathbf{q}(t)$  описывает действие случайных факторов, которые задаются гауссовскими случайными величинами с матрицей влияния  $\bar{\mathbf{F}}(t)$  и характеристиками:

$$M\{\mathbf{q}(t)\} = \bar{\mathbf{q}}(t), \quad M\{(\mathbf{q}(t) - \bar{\mathbf{q}}(t))(\mathbf{q}(\tau) - \bar{\mathbf{q}}(\tau))^T\} = \mathbf{Q}(t)\delta(t - \tau). \quad (2)$$

Матрицы  $\bar{\mathbf{A}}(t), \bar{\mathbf{B}}(t)$  имеют вид

$$\bar{\mathbf{A}}(t) = \begin{pmatrix} -k_4\phi_s(t) - k_1 & k_4\phi_z(t) & 0 \\ k_4\phi_s(t) & -k_4\phi_z(t) - k_2 & 0 \\ k_4\phi_s(t) - k_5 & -k_4\phi_z(t) & 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}}(t) = \begin{pmatrix} k_3 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Функции  $\phi_s(t), \phi_z(t)$  описывают расчетные значения текущего спроса и объема товара на складе. Коэффициенты  $k_j, j = \overline{1,5}$  характеризуют порчу товара при хранении, темп потребления, торговую наценку, темп продаж, плату за хранение.

Пусть торговая фирма устанавливает скидку на товар за счет снижения торговой наценки на величину  $p_r$ . Тогда коэффициент торговой наценки станет равным  $k_3^* = (1 - p_r)k_3$ . Будем предполагать, что темп продаж и потребления увеличится пропорционально величине  $p_r$ , т.е.  $k_4^* = (1 + p_r)k_4$ ,  $k_2^* = (1 + p_r)k_2$ . Кроме того, будем предполагать, что момент установления скидок определяется автоматически при снижении реализованного дохода относительно его желаемого значения, а продолжительность действия скидок задается менеджером торговой фирмы. Таким образом, коэффициенты  $k_2, k_3, k_4$  изменяются в момент установления скидок и восстанавливают свои первоначальные значения после их отмены.

Обозначим

$$K_j = \begin{cases} k_j, & \text{если нет скидок,} \\ k_j^*, & \text{если есть скидки, } j = 2, 3, 4. \end{cases}$$

Тогда матрицы  $\bar{\mathbf{A}}(\cdot), \bar{\mathbf{B}}(\cdot)$  будут зависеть от значений  $K_2, K_3, K_4$ , т.е.  $\bar{\mathbf{A}}(t, K_2, K_4), \bar{\mathbf{B}}(t, K_3)$ .

## 2. Определение объема поставок

Управление с использованием информационных технологий осуществляется по информации, которая достаточно часто бывает неполной и имеет ошибки. Будем считать, что математическая модель информационной системы имеет вид

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{H}\mathbf{x}(i) + \mathbf{r}(i), \quad (4)$$



где  $\mathbf{H}$  – матрица, определяющая полноту информации;  $\mathbf{r}(i)$  – вектор, описывающий погрешности информационной системы, которые задаются последовательностью гауссовских случайных величин с характеристиками:

$$M\{\mathbf{r}(i)\} = 0, \quad M\{\mathbf{r}(i)\mathbf{r}(j)^T\} = \mathbf{R}\delta_{i,j}, \quad M\{\mathbf{q}(i)\mathbf{r}(j)^T\} = 0.$$

В (4) используется вектор состояния дискретной стохастической модели, полученной согласно [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(i+1) &= \mathbf{A}(i)\mathbf{x}(i) + \mathbf{B}(i)u(i) + \mathbf{F}(i)\mathbf{q}(i), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ u(i+1) &= u(i) + \Delta t\omega(i), \quad u(0) = u_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{A}(i) = \mathbf{I}_3 + \Delta t\bar{\mathbf{A}}(t_i)$ ;  $\mathbf{B}(i) = \Delta t\bar{\mathbf{B}}(t_i)$ ;  $\mathbf{F}(i) = \sqrt{\Delta t}\bar{\mathbf{F}}(t_i)$ ,  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  – шаг дискретизации,  $\mathbf{I}_3$  – единичная матрица третьего порядка,  $i$  соответствует моменту времени  $t_i = t_0 + i\Delta t$ ,  $i = \overline{0, N}$ .

Так как в реальных условиях темп продаж и потребления точно не известны, то вводится вектор неизвестных параметров  $\boldsymbol{\theta} = (K_2, K_4)^T$ . При этом предполагается, что априорные распределения векторов начальных условий  $\boldsymbol{\theta}_0$  и  $\mathbf{x}_0$  являются гауссовскими.

Объем поставки определяется на основе минимизации математического ожидания квадратичного критерия [4] при слежении за величиной желаемого дохода  $w_z(\cdot)$ :

$$\begin{aligned} J^{(s)}(t_i) &= 0,5M \left\{ \int_{t_i}^{t_i+I_p\Delta t} [(x^{(s)}(t) - w_z(t_i))^T C_s (x^{(s)}(t) - w_z(t_i)) + \right. \\ &\quad \left. + u(t)^T D_2 u(t) + \omega(t)^T D_1 \omega(t) + \omega_{\text{оп}}(t)^T D_1 \omega_{\text{оп}}(t)] dt \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\mathbf{S} = (0 \ 0 \ 1)$  – задает слежение только за объемом желаемого дохода;  $C_s, D_1, D_2$  – положительные весовые коэффициенты;  $\omega_{\text{оп}}(t)$  – оптимальное управление для (6);  $I_p\Delta t$  – величина скользящего интервала оптимизации.

Динамика дохода на интервале оптимизации описывается стационарной дискретной прогнозирующей моделью

$$\begin{aligned} x_m^{(s)}(j+1) &= A_s(i, \hat{\theta}(i))x_m^{(s)}(j) + B_s(i, K_3)u(i) + F_s(i)\bar{q}(i), \\ x_m^{(s)}(j=i) &= S\hat{x}(i), \quad j = i, i+l_p-1, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $A_s(i, \hat{\theta}(i)) = SA(i, \hat{\theta}(i))S^T$ ,  $B_s(i, K_3) = SB(i, K_3)$ ,  $F_s = SF(i)$ ,  $\hat{x}(\cdot), \hat{\theta}(\cdot)$  – оценки состояния и параметров, полученные с помощью дискретных фильтров Калмана [5]; « $m$ » указывает на принадлежность прогнозирующей модели.

Управление, задающее изменение объема поставок, определяется следующим образом:

$$\omega(i) = \omega_{\text{оп}}(i) = -D_1^{-1}W_2^{(s)}(i), \quad (8)$$

где  $W_2^{(s)}(i)$  является решением в обратном времени системы разностных уравнений

$$\begin{aligned} g_m^{(s)}(j-1) &= [2 - A_s(i, \hat{\theta}(i))]g_m^{(s)}(j) - B_s(i, K_3)u(i) - F_s(i)\bar{q}(i), \\ g_m^{(s)}(i+l_p) &= x_m^{(s)}(i+l_p), \\ W_1^{(s)}(j-1) &= A_s(i, \hat{\theta}(i))^T W_1^{(s)}(j) + \Delta t C_s (g_m^{(s)}(j) - w_z(t_i)), \\ W_1^{(s)}(i+l_p) &= 0, \quad W_2^{(s)}(j-1) = W_2^{(s)}(j) + B_s(i, K_3) + \Delta t D_2 u(i), \\ W_2^{(s)}(i+l_p) &= 0, \quad j = i+l_p, i+1. \end{aligned} \quad (9)$$

При определении объема поставок требуется, чтобы на складе не было избытка и недостатка товара, что приводит к убыткам. В связи с этим вводятся ограничения [6]. Кроме того, предполагается, что товар поставляется только целыми упаковками, время поставки постоянное, равное  $t_p \Delta t$ , и плата за товар осуществляется по факту, т.е. в момент его получения.

Пусть  $z_{\max}(i), z_{\min}(i)$  – значения, задающие максимальный и минимальный объем товара, который может храниться на складе, а  $z_z(i)$  – объем товара, который желательно иметь на складе для стабильной работы.

Расчетный темп продаж и оценку объема товара на складе без новой поставки определим следующим образом:

$$\alpha(i) = K_4 \phi_s(i) z_z(i), \quad \hat{\beta}(i) = \hat{x}(i) - t_p \alpha(i). \quad (10)$$

Тогда предварительный объем поставки определяется по формуле

$$u^{(1)}(i) = \begin{cases} 0, & \hat{\beta}(i) > z_{\min}(i), \\ u(i), & \hat{\beta}(i) \leq z_{\min}(i). \end{cases} \quad (11)$$

Если  $u^{(1)}(i) \neq 0$ , то осуществляется дальнейшее уточнение объема поставки при использовании неравенств:

$$u^{(2)}(i) = \begin{cases} z_{\max}(i) - z_{\min}(i), & \hat{\beta}(i) + u^{(1)}(i) < z_{\min}(i), \\ u^{(1)}(i), & z_{\min}(i) \leq \hat{\beta}(i) + u^{(1)}(i) < z_{\max}(i), \\ z_{\max}(i) - z_z(i), & \hat{\beta}(i) + u^{(1)}(i) > z_{\max}(i). \end{cases} \quad (12)$$

Пусть  $h$  – стоимость упаковки товара. Тогда выражения

$$\mu(i) = \left\lceil \frac{u^{(2)}(i)}{h} \right\rceil, \quad h^* = u^{(2)}(i) - \mu(i)h \quad (13)$$

определяют количество целых упаковок в поставке и остаток.

Окончательно объем поставки определяется следующим образом:

$$u^{(3)}(i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mu(i) = 0 \text{ и } h^* \leq 0,5h, \\ \mu(i)h, & \text{если } \mu(i) \neq 0, \text{ и } h^* \leq 0,5h, \\ (\mu(i) + 1)h, & \text{если } \mu(i) \neq 0, \text{ и } h^* > 0,5h. \end{cases} \quad (14)$$

### 3. Численное моделирование

Для численного моделирования использовались данные работы торговой фирмы, которая специализируется на торговле продуктами питания. Определение объема поставки осуществлялось при отсутствии информации об объеме товара у потребителя, при этом интервал оптимизации был равен времени поставки ( $l_p = t_p$ ) и  $p_r = 0,05$ . Скидки устанавливались автоматически в момент снижения реализованного дохода от его желаемого значения с продолжительностью в одну неделю.

Результаты моделирования приводятся на рисунках: на рис. 1 – желаемый и реализованный доход, на рис. 2 – максимальное, минимальное и заданное значения объемов товара на складе, объем поставок и реализованный объем товара на складе. Кроме того, на рисунках приводятся кривые, указывающие моменты и продолжительность действия скидок.

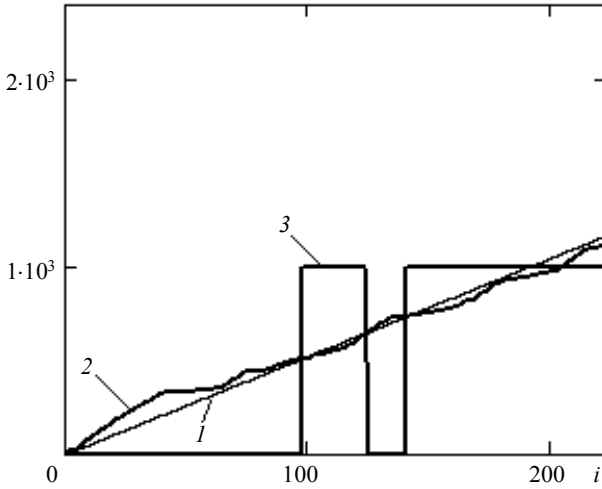


Рис. 1. Желаемый доход (кр. 1), реализованный доход (кр. 2), моменты введения скидок и их продолжительность (кр. 3)

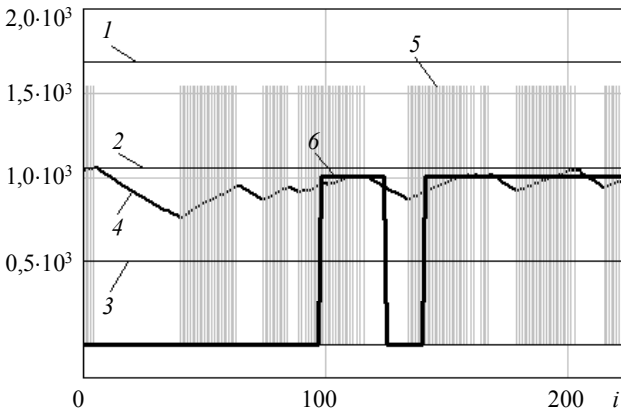


Рис. 2. Результаты моделирования:  $z_{\max}(i)$  (кр. 1),  $z_z(i)$  (кр. 2),  $z_{\min}(i)$  (кр. 3),  $z(i)$  (кр. 4),  $u(i)$  (кр. 5), моменты введения скидок и их продолжительность (кр. 6)

На рисунках видно, что удовлетворяются все требования, предъявляемые к качеству функционирования системы управления.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрена задача управления поставками при использовании автоматически устанавливаемых скидок. Приведенные результаты могут стать основой для принятия решения о пересмотре цены на товар, так как практически половину времени моделирования он продается со скидкой.

С учетом действия случайных факторов сравнение дохода, полученного при работе со скидками и без них, осуществлялось для усредненного критерия по 30 прогонам имитационной модели. Результаты показали, что при использовании скидок достигается существенное увеличение дохода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Словарь* по экономике: пер. с англ. под ред. П.А. Ватника. – СПб.: Экономическая школа, 1998. – С. 278–279.
2. *Reshetnikova G.N.* Adaptive control of delivery and advertising. Algorithms. Models. Limitations. Monograph. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – P. 152. ISBN: 978-3-659-29616-1
3. *Решетникова Г.Н., Сидорова Е.Ф., Савченко П.А., и др.* Численные методы для экономических расчетов. Вычислительный практикум: учебно-методическое пособие. – Томск: Издательский Дом НИ ТГУ, 2017. – 114 с.
4. *Reshetnikova G.N., Khabibulina N.Y., Kotsubinsky V.P., and Polonskaya M.S.* Servo-System simulation [Electronic resources] // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): Proceedings of the International Conference, Tomsk, 1–4 December, 2015 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU); Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – [S. l.]: IEEE, 2015. – [4 p.]. – Title screen. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414890> (дата обращения: 16.03.2016).
5. *Решетникова Г.Н.* Моделирование систем: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 441 с.
6. *Решетникова Г.Н., Малахова Т.Е.* Управление поставками с прогнозированием. // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016): Материалы XV международной конференции имени А.Ф. Терпугова (12–16 сентября 2016г.). – Томск. Изд-во Том. ун-та, 2016. – Ч. 2. – С. 69–74.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ\*

*С.И. Соловьёв*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
г. Казань, Россия*

Высокочастотный индукционный разряд (ВЧИ-разряд) широко используется в разнообразных технологических процессах: обработке металлов, стекол, порошковых материалов, тонких пленок, текстиля и кожевенно- меховых полуфабрикатов. Режимы обработки материалов в этих процессах чрезвычайно чувствительны к основным характеристикам ВЧИ-разряда. Для эффективного и качественного выбора конструктивных решений при создании ВЧИ-установок необходимо применение математического моделирования.

Моделирование баланса заряженных частиц ВЧИ-разряда сводится к нахождению минимального собственного значения, отвечающего положительной собственной функции дифференциальной задачи на собственные значения с коэффициентами, нелинейно зависящими от спектрального параметра [1]. Решение этой задачи определяет условие, необходимое для поддержания стационарного ВЧИ-разряда пониженного давления. В настоящей работе задача аппроксимируется сеточной схемой метода конечных элементов произвольного порядка. Сеточная задача эквивалентна матричной задаче на собственные значения с нелинейной зависимостью от спектрального параметра. Для вычисления минимального собственного значения и соответствующего положительно-го собственного вектора матричной нелинейной задачи на собственные значения предложен и обоснован метод простой итерации с предобуславливанием. В отличие от результатов [2] в настоящей работе не предполагается монотонная зависимость коэффициентов дифференциальной задачи от спектрального параметра.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 15-41-02672, 16-01-00301, 17-41-160277).

### Постановка задачи

Задача состоит в нахождении минимального собственного значения  $\lambda$  и соответствующей положительной собственной функции  $u(x)$  нелинейной дифференциальной задачи на собственные значения

$$\begin{aligned} -(p(\lambda s(x))u'(x))' &= \lambda r(\lambda s(x))u(x), \quad x \in (0, l), \\ u(0) &= u(l) = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $p(\mu)$ ,  $r(\mu)$ ,  $s(x)$  – заданные положительные гладкие функции;  $l$  – заданное положительное число. Поскольку коэффициенты – гладкие функции, то собственная функция  $u(x)$  является гладкой.

Запишем дифференциальную задачу в виде вариационной нелинейной задачи на собственные значения: требуется найти минимальное собственное значение  $\lambda$  и соответствующую положительную собственную функцию  $u(x)$ ,  $u(0) = u(l) = 0$ , удовлетворяющие уравнению

$$\int_0^l p(\lambda s(x))u'(x)v'(x)dx = \lambda \int_0^l r(\lambda s(x))u(x)v(x)dx$$

для произвольной гладкой функции  $v(x)$ ,  $v(0) = v(l) = 0$ .

### Сеточная схема

Разобьем отрезок  $[0, l]$  равноотстоящими точками  $x_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ , на элементы  $[x_{i-1}, x_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $h = l/m$ . Определим пространство конечных элементов, состоящее из непрерывных функций  $v^h(x)$ ,  $v^h(0) = v^h(l) = 0$ , которые на каждом элементе  $[x_{i-1}, x_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , являются полиномами степени не выше  $n$

Вариационную задачу на собственные значения заменим сеточной задачей: требуется найти минимальное собственное значение  $\lambda^h$  и соответствующую положительную собственную функцию  $u^h(x)$  из пространства конечных элементов, удовлетворяющие уравнению

$$\int_0^l p(\lambda^h s(x))(u^h(x))'(v^h(x))'dx = \lambda^h \int_0^l r(\lambda^h s(x))u^h(x)v^h(x)dx$$

для произвольной функции  $v^h(x)$  из пространства конечных элементов.

### Итерационный метод

Сеточная задача эквивалентна матричной задаче на собственные значения

$$A(\lambda)u = \lambda B(\lambda)u,$$

где  $A(\lambda)$  и  $B(\lambda)$  – симметричные положительно определенные квадратные матрицы размера  $N$ ;  $u$  – вектор длины  $N$ ,  $N = mn - 1$ .

Для фиксированного  $\mu$  зададим матрицу  $C(\mu)$ , удовлетворяющую соотношениям

$$\delta_0(\mu)(C(\mu)v, v) \leq (A(\mu)v, v) \leq \delta_1(\mu)(C(\mu)v, v).$$

Обозначим

$$\|v\|_{B(\mu)}^2 = (B(\mu)v, v).$$

Зададим число  $\mu^0$  и вектор  $u^0$  с помощью соотношений

$$\mu^0 = R(\mu^0, u^0), \quad \|u^0\|_{B(\mu^0)} = 1.$$

Для  $n = 0, 1, \dots$  вычислим числа  $\mu^{n+1}$  и векторы  $u^{n+1}$  по следующим формулам:

$$\mu^{n+1} = R(\mu^{n+1}, u^{n+1}) = R(\mu^{n+1}, v^{n+1}),$$

$$\|u^{n+1}\|_{B(\mu^{n+1})} = 1,$$

где

$$v^{n+1} = u^n - \tau^n w^n,$$

$$\tau^n = 2/(\delta_0(\mu^n) + \delta_1(\mu^n)),$$

$$w^n = C(\mu^n)^{-1}(A(\mu^n) - \mu^n B(\mu^n))u^n.$$

Исследована сходимость последовательности приближений  $\mu^n$ ,  $n = 0, 1, \dots$  к минимальному собственному значению  $\lambda$  матричной задачи. Установлены следующие оценки погрешности:

$$0 \leq \mu^n - \lambda \leq cq^n,$$

где  $n = 0, 1, \dots$ ;  $c$  – постоянная, не зависящая от  $n$ ;  $0 < q < 1$ .



---

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000. – 348 с.
2. *Соловьёв С.И.* Нелинейные задачи на собственные значения. Приближённые методы. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 256 с.

# АПРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИИ КОЛИЧЕСТВА ГЛАДКОСТЕПЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Ф.Ф. Шарифуллина**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

Натуральное число называется  $y$ -гладким, если все его простые делители не превосходят  $y$ .

Натуральное число  $n$  называется  $y$ -гладкостепенным, если любой делитель  $n$ , являющийся степенью  $p^k$  простого числа  $p$ , удовлетворяет условию  $p^k \leq y$ .

Анализ многих теоретико-числовых алгоритмов, таких, как алгоритмы факторизации, тесты простоты, алгоритмы дискретного логарифмирования, сводится к оценке функций количества гладких и гладкостепенных чисел.

Функция  $\psi^*(x, y)$ , равная числу  $y$ -гладкостепенных чисел, не превосходящих  $x$ , играет существенную роль при выборе параметров метода факторизации Ленстры с использованием эллиптических кривых. Для сходимости метода Ленстры необходимо, чтобы размерность эллиптической кривой, используемой в методе, была  $y$ -гладкостепенным числом при  $x$ , равном меньшему множителю факторизируемого числа.

Отметим, что расчет значений функции  $\psi^*(x, y)$  никем ранее не выполнялся, а в приложениях ее значение обычно заменяется на  $\psi(x, y)$  – функцию количества  $y$ -гладких чисел, не превосходящих  $x$ . Например, в работе [1, с. 338] расчеты сходимости процедуры факторизации целых чисел методом эллиптических кривых Ленстры выполнены с использованием функции  $\psi(x, y)$ , хотя должна была быть использована  $\psi^*(x, y)$ .

В статье [2] автором было доказано, что при  $y \rightarrow \infty$  и  $y < \ln x$  функция  $\psi^*(x, y)$  совпадает с функцией  $\tilde{\psi}^*(y)$  количества всех  $y$ -гладкостепенных чисел.

В данной работе удалось улучшить предыдущую оценку  $\tilde{\psi}^*(y)$  и получить новую.

Элементы возрастающей последовательности простых чисел будем обозначать малой латинской буквой  $p_i$ , где индекс  $i$  указывает на порядковый номер данного простого числа:  $p_1 = 2, p_2 = 3, \dots, p_k \dots$

Число всех простых чисел, не превышающих  $y$ , обозначим за  $\pi(y)$ . Ясно, что  $\pi(p_k) = k$ .

Любое  $y$ -гладкостепенное число  $n$  может быть записано в виде

$$n = p_1^{s_1} \cdot \dots \cdot p_{\pi(y)}^{s_{\pi(y)}},$$

где  $0 \leq s_i < \log_{p_i} y$ , а  $1 \leq i \leq \pi(y)$ . Тогда число всех  $y$ -гладкостепенных чисел равно

$$\tilde{\psi}^*(y) = \prod_{i=1}^{\pi(y)} \log_{p_i} y.$$

Преобразуем данное выражение следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}^*(y) &= \prod_{i=1}^{\pi(y)} \log_{p_i} y = 2^{\pi(y) - \pi(\sqrt{y})} \prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \log_{p_i} y = 2^{\pi(y) - \pi(\sqrt{y})} \prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \frac{\ln y}{\ln p_i} \approx \\ &\approx 2^{\pi(y) - \pi(\sqrt{y})} \prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \frac{\ln y}{\ln p_i} = 2^{\pi(y) - \pi(\sqrt{y})} \frac{\prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln y}{\prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln p_i}. \end{aligned}$$

Отдельно оценим получившиеся произведения. В числителе все просто:

$$\prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln y = (\ln y)^{\pi(\sqrt{y})},$$

а знаменатель прологарифмируем:

$$\ln \prod_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln p_i = \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln \ln p_i.$$

Используем асимптотическое равенство из [3] при  $x \rightarrow \infty$ :

$$\sum_{p \leq x} \frac{1}{p} = \ln \ln x + \gamma + O\left(\frac{1}{\ln x}\right),$$

где  $\gamma$  – постоянная Эйлера.

Будем считать

$$\ln \ln p_i \sim \sum_{p \leq p_i} \frac{1}{p},$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \ln \ln p_i &= \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \sum_{p \leq p_i} \frac{1}{p} = \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) + \dots + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{p_{\pi(\sqrt{y})}}\right) = \\ &= \frac{\pi(\sqrt{y})}{2} + \frac{\pi(\sqrt{y})-1}{3} + \dots + \frac{1}{p_{\pi(\sqrt{y})}} = \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \frac{\pi(\sqrt{y})-i+1}{p_i} = \\ &= (\pi(\sqrt{y})+1) \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \frac{1}{p_i} - \sum_{i=1}^{\pi(\sqrt{y})} \frac{i}{p_i} \approx (\pi(\sqrt{y})+1) \ln \ln \pi(\sqrt{y}) - \frac{\pi(\sqrt{y})}{\ln \pi(\sqrt{y})}. \end{aligned}$$

Оценка второй суммы получена эмпирически.

Таким образом, при  $y \rightarrow \infty$

$$\tilde{\psi}^*(y) \approx 2^{\pi(y)-\pi(\sqrt{y})} \frac{(\ln y)^{\pi(\sqrt{y})}}{\exp\left\{(\pi(\sqrt{y})+1) \ln \ln \pi(\sqrt{y}) - \pi(\sqrt{y}) / \ln \pi(\sqrt{y})\right\}}. \quad (1)$$

Если продолжить процесс группировки множителей  $\tilde{\psi}^*(y)$ , получим новую формулу для нахождения  $\tilde{\psi}^*(y)$ :

$$\tilde{\psi}^*(y) = \prod_{i=2}^{\log_2 y} i^{\pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right)}. \quad (2)$$

**Пример.** Пусть  $y = 29$ , тогда

$$\log_2 y = 5, \quad \pi(y) = 10, \quad \pi(\sqrt{y}) = 3, \quad \pi(\sqrt[3]{y}) = 2, \quad \pi(\sqrt[4]{y}) = 1, \quad \pi(\sqrt[5]{y}) = 0.$$

$$\tilde{\psi}^*(29) = \prod_{i=2}^5 i^{\pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right)} = 2^{10-3} \cdot 3^{3-2} \cdot 4^{2-1} \cdot 5^{1-0} = 7680.$$

Преобразуем формулу (2):

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}^*(y) &= \prod_{i=2}^{\log_2 y} i^{\pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right)} = \exp \left\{ \ln \prod_{i=2}^{\log_2 y} i^{\pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right)} \right\} = \\ &= \exp \left\{ \sum_{i=2}^{\log_2 y} \ln i^{\pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right)} \right\} = \exp \left\{ \sum_{i=2}^{\log_2 y} \left( \pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right) \right) \ln i \right\}. \end{aligned}$$

Дальнейшие вычисления зависят от аппроксимации функции  $\pi(y)$ . Асимптотический закон распределения простых чисел не дает удовлетворительного результата, поэтому мы используем оценку функции  $\pi(x)$  из [4, с. 45], полученную Чебышевым: при всех  $x \geq 6$  справедливы неравенства

$$a \frac{x}{\ln x} \leq \pi(x) \leq b \frac{x}{\ln x},$$

где  $a = 0.5 \ln 2$ ;  $b = 5 \ln 2$ .

Данная теорема была также доказана для лучших констант  $a = 0.921\dots$ ;  $b = 1.105\dots$ , но при достаточно больших  $x$ . Таким образом, значения констант  $a$  и  $b$  зависят от размера  $x$ . Поэтому рассмотрим общий случай, не используя конкретные значения для данных констант.

Продолжим наши вычисления. Введем новое обозначение  $k = \log_2 y$ :

$$\begin{aligned} \exp \left\{ \sum_{i=2}^k \left( \pi\left(\frac{1}{y^{i-1}}\right) - \pi\left(\frac{1}{y^i}\right) \right) \ln i \right\} &\approx \exp \left\{ \sum_{i=2}^k \left( a \frac{\frac{1}{y^{i-1}}}{\ln y^{i-1}} - b \frac{\frac{1}{y^i}}{\ln y^i} \right) \ln i \right\} = \\ &= \exp \left\{ \sum_{i=2}^k \left( a \frac{(i-1)y^{\frac{1}{i-1}}}{\ln y} - b \frac{iy^{\frac{1}{i}}}{\ln y} \right) \ln i \right\} = \\ &= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \sum_{i=2}^k \left( a(i-1)y^{\frac{1}{i-1}} - biy^{\frac{1}{i}} \right) \ln i \right\} = \\ &= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} iy^{\frac{1}{i}} \ln \frac{(i+1)^a}{i^b} \right) \right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} iy^{\frac{1}{i}} \ln \frac{(i+1)^b (i+1)^{a-b}}{i^b} \right) \right\} = \\
&= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} iy^{\frac{1}{i}} \left( \ln \left( \frac{i+1}{i} \right)^b + \ln (i+1)^{a-b} \right) \right) \right\} = \\
&= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} y^{\frac{1}{i}} \left( b \ln \left( 1 + \frac{1}{i} \right)^i + (a-b) \ln (i+1)^i \right) \right) \right\} = \\
&= \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} y^{\frac{1}{i}} b \ln \left( 1 + \frac{1}{i} \right)^i + \sum_{i=2}^{k-1} y^{\frac{1}{i}} (a-b) \ln (i+1)^i \right) \right\} \approx \\
&\approx \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} 2by^{\frac{1}{i}} \right) \right\}
\end{aligned}$$

Таким образом, при некоторых значениях констант  $a$  и  $b$

$$\tilde{\Psi}^*(y) \approx \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( ay \ln 2 - bky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} 2by^{\frac{1}{i}} \right) \right\}. \quad (3)$$

Для небольших значений  $y$  подошли константы  $a=1,1; b=0,9$ .

$$\tilde{\Psi}_1^*(y) \approx \exp \left\{ \frac{1}{\ln y} \left( 1,1y \ln 2 - 0,9ky^{\frac{1}{k}} \ln k + \sum_{i=2}^{k-1} 2y^{\frac{1}{i}} \right) \right\}. \quad (4)$$

Сравним точные значения функции  $\tilde{\Psi}^*(y)$  со значениями, полученными по формуле (4) (таблица).

$y$	$\tilde{\Psi}^*(y)$	$\tilde{\Psi}_1^*(y)$	$\tilde{\Psi}^*(y)/\tilde{\Psi}_1^*(y)$
15	192	196,0	0,98
20	960	991,0	0,97
30	7680	7670,1	1,00
50	442368	430999,2	1,02
90	330301440	352265180	0,94
150	1546188226560	2304152373997	0,67
300	$6,3 \cdot 10^{20}$	$4,8 \cdot 10^{20}$	1,31
600	$2,9 \cdot 10^{37}$	$2,2 \cdot 10^{35}$	1,32

### Заключение

Получены две формулы для аппроксимации функции  $\tilde{\psi}^*(y)$ . Для  $y \rightarrow \infty$  подходит формула (1), а для небольших  $y$  – формула (4), которая, как видно из таблицы, довольно точно аппроксимирует функцию  $\tilde{\psi}^*(y)$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Crandall R. Pomerance C.* The prime numbers: a computational perspective. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – P. 604.
2. *Шарифуллина Ф.Ф.* О гладкостепенных числах // Изв. вузов. Математика. – 2017 (принято в печать).
3. *Прахар К.* Распределение простых чисел. – М.: Мир, 1967. – 512 с.
4. *Нестеренко Ю.В.* Теория чисел. – М.: Академия, 2008. – 272 с.
5. *Ишмухаметов Ш.Т.* Методы факторизации натуральных чисел. – Казань: Казанский университет, 2011. – 256 с.
6. *Ишмухаметов Ш.Т., Рубцова Р.Г., Шарифуллина Ф.Ф.* Расчет функции распределения гладких элементов // Перспективы науки – 2013. – Т. 10. – № 49. – С. 135–137.
7. *Ишмухаметов Ш.Т., Шарифуллина Ф.Ф.* О распределении полупростых чисел // Изв. вузов. Математика – 2014. – № 8. – С. 53–59.
8. *Ishmukhametov Sh.T., Sharifullina F.F.* About power smooth numbers // Reseach Journal of Applied Sciences. – 2015. – V. 10. – No. 8. – P. 381–384.
9. *Ishmukhametov Sh.T., Sharifullina F.F.* An algorithm for counting smooth integers // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2016. – V. 37. – No. 2. – P. 128–137.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

<b>Маммадова Г.А., Маммадова М.А.</b> The application of modern methods and algorithms in the identification based on facial lines.....	3
<b>Алдохин А.С., Замятин А.В., Телицын Е.А., Тренькаев В.Н., Яновский В.Д.</b> Сервер истории для систем управления технологическими процессами на базе свободного программного обеспечения .....	12
<b>Андрющенко В.С., Перец Е.Ю., Лялюхова И.Е.</b> Классификация иммуносигнатурных данных для задач ранней диагностики опасных заболеваний .....	18
<b>Афанасьев А.А., Замятин А.В.</b> Моделирование изменений ландшафтного покрова по альтернативным сценариям .....	26
<b>Дружинин Д.В., Замятин А.В.</b> Концептуальные основы создания программного обеспечения кодека для сжатия видеоданных графического интерфейса пользователя .....	34
<b>Замятин А.В., Андреева В.В., Чернышов С.В., Телицын Е.А.</b> Построение подсистемы формирования отчетов для SCADA-систем с использованием свободного программного обеспечения.....	41
<b>Зиннатуллин А.Ф.</b> Применение наивного байесовского классификатора в обработке текстов .....	50
<b>Костюк Ю.Л., Литовченко М.И.</b> Распознавание граней трехмерных объектов по данным лазерного сканирования .....	55
<b>Костюк Ю.Л., Рубинский М.В.</b> Распознавание состояний нефтепровода по данным измерений от датчиков.....	62
<b>Ламонова Т.С., Мирза Н.С.</b> Расширение стандарта IFC Alignment и классификатора OmniClass для дорожной отрасли.....	68
<b>Лялюхова И.Е., Перец Е.Ю., Стогнушко О.Д., Андрющенко В.С.</b> Анализ информативности признаков при сканировании пептидных матриц.....	74
<b>Ляшева С.А., Шлеймович М.П.</b> Контекстный поиск изображений на основе энергетических признаков вейвлет-преобразования .....	81



<b>Ляшева С.А., Шлеймович М.П.</b> Прогнозирование параметров быстропротекающих процессов с использованием нейронных сетей .....	89
<b>Мухин И.Д., Карпов К.В.</b> Генерация сюжетов на основе бесконтактных формальных грамматик.....	95
<b>Пестов Е.В.</b> Анализ инвариантности технологического сигнала с использованием нейронных сетей.....	101
<b>Прокудина Ю.А., Мирза Н.С.</b> Алгоритмы фильтрации файлов данных лазерного сканирования.....	108
<b>Саринова А.Ж.</b> Алгоритмы сжатия гиперспектральных аэрокосмических изображений с учётом межканальной корреляции .....	114
<b>Трусфус М.В.</b> Интеллектуальная система отбора картофеля.....	121
<b>Углов А.С., Замятин А.В.</b> Информационно-программный комплекс для решения задач персонализированной медицины с применением интеллектуального анализа данных .....	126
<b>Шестакова Ю.А.</b> Распознавание состояния растения .....	135
<b>Шильников К.В.</b> Распознавание объекта, привлекающего внимание на основе метода кластеризации.....	139

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

<b>Burnashev R., Yalkaev N., Georgiev V.</b> Data structuring and data processing for the information intellectual applications .....	145
<b>Бердюгин А.И., Выговский В.Ю.</b> Система терагерцового видения.....	151
<b>Бурнашев Р., Морозова М., Мистриков А., Георгиев В.</b> Разработка прототипа экспертной системы «DBExpert» по подбору СУБД при разработке программного обеспечения .....	158
<b>Галанин Д.Н., Георгиев В.О.</b> Исследование вопросов преобразования кода .....	164
<b>Георгиев В.О.</b> Концепции учебно-макетной реализации генератора ПО сложных систем .....	168
<b>Гусенков А.М., Жибрик О.Н.</b> Поиск в коллекции математических текстов.....	173
<b>Девятков Т.В.</b> GPSS Cloud – система облачного имитационного моделирования .....	180
<b>Долгов Д.А.</b> Вычисление НОД как решение системы линейных уравнений в GF(2).....	185

<b>Камалов А.М., Бурнашев Р.А.</b> Разработка прототипа экспертной системы «MEDExpert» дифференциальной диагностики заболеваний.....	189
<b>Карпов К.В., Мухин И.Д.</b> Звуковое виртуальное позиционирование .....	193
<b>Кацман Ю.Я., Полянский С.В., Буркатовская Ю.Б.</b> Исследование характеристик СМО, основанной на квантовании .....	199
<b>Кошкина К.В., Кошкина Л.Ю., Хальфина А.А.</b> Проектирование базы данных выпускников по направлению 18.03.02 .....	207
<b>Перухин М.Ю.</b> Разработка виртуального стенда для изучения управления периодическими процессами .....	213
<b>Прокопьев Н.А.</b> Использование шаблонного анализа ограниченных естественно-языковых ответов на вопросы в системе электронного тестирования.....	218
<b>Старыгина С.Д., Нуриев Н.К., Печеный Е.А.</b> Построение математической модели процесса регламентации педагогического тестирования .....	223
<b>Старыгина С.Д., Печеный Е.А., Нуриев Н.К.</b> Построение математической модели измерительного средства педагогического тестирования .....	229
<b>Шигапова Н.Д., Понкратов А.С., Кошкина Л.Ю.</b> Онтологическая модель информационной системы международной конференции «Пищевые технологии и биотехнологии» .....	234
<b>Ямалеева Г.Н., Перухин М.Ю., Гибадуллин Р.Ф.</b> Оптимизация исполнения SQL-запросов к базам данных под управлением MySQL .....	239

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

<b>Алексееенко М.А., Гендрин И.Ю.</b> Статистический анализ результатов моделирования переноса излучения в облачной атмосфере.....	242
<b>Андрианова А.А., Корепанова А.А., Халилова И.Ф.</b> О вариантах построения метода ветвей и границ для решения задачи вогнутого программирования .....	247
<b>Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М.</b> Линеаризация нелинейной математической модели сложного объекта управления.....	253

---

<b>Бушкова Т.В.</b> Анализ зависимости стоимости квартир г. Томска от различных факторов на базе полиномиальной модели второго порядка .....	259
<b>Вахитов Г.З., Еникеева З.А.</b> Использование нейросетей для прогнозирования динамики фондового рынка .....	264
<b>Войгишек А.В.</b> Особенности построения и оптимизации рандомизированных проекционных функциональных алгоритмов .....	267
<b>Габрелян Н.Л., Павельчук А.В., Масловская А.Г.</b> Гибридный алгоритм для решения задачи моделирования электронно-индуцированной зарядки диэлектриков с учетом эффекта запаздывания .....	276
<b>Еникеев Р.Р.</b> Нахождение коэффициентов Безу с помощью расширенного обобщенного бинарного алгоритма .....	284
<b>Исаев М.М., Назаров Р.Б., Бадалова Н.Х., Мамедова М.Б., Ф. Агаева</b> Разработка комбинированного алгоритма и информационно-измерительная система для повышения точности измерений .....	292
<b>Мамедова М.Б., Назаров Р.Б., Исаев М.М., Бадалова Н.Х.</b> Интеллектуальная система измерения количества нефти с улучшенными показателями точности .....	300
<b>Маркелов Г.Е.</b> Математическая модель электротепловой системы .....	308
<b>Назаров А.А., Пауль С.В.</b> Исследование RQ-системы ММРР/М/1/1 с вызываемыми заявками асимптотическим методом .....	314
<b>Параев Ю.И., Грекова Т.И., Полуэктова К.О.</b> Оптимальное управление односекторной экономикой при случайном изменении фондовооружённости труда .....	322
<b>Полуэктова К.О., Грекова Т.И.</b> Оптимальное управление для двухсекторной стохастической модели экономики .....	328
<b>Решетникова Г.Н., Малахова Т.Е.</b> Адаптивное управление поставками при использовании скидок .....	335
<b>Соловьёв С.И.</b> Численное моделирование баланса электронов высокочастотного индукционного разряда пониженного давления .....	342
<b>Шарифуллина Ф.Ф.</b> Аппроксимация функции количества гладкостепенных элементов .....	346

*Научное издание*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
(ИТММ-2017)**

**Материалы  
XVI Международной конференции  
имени А. Ф. Терпугова  
29 сентября – 3 октября 2017 г.**

**Часть 2**

Редактор *Н.И. Шидловская*  
Дизайн, верстка *Д.В. Фортеса*

**ООО «Издательство научно-технической литературы»**  
634050, Томск, пл. Новособорная, 1, тел. (3822) 533-335

---

Изд. лиц. ИД № 04000 от 12.02.2001. Подписано к печати 09.09.2017.  
Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. п. л. 20,69. Уч.-изд. л. 23,18. Тираж 100 экз. Заказ № 31.

---