ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 3 (36)

Красноярск 2011

ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 3 (36)

Главный редактор
доктор технических наук
Ковалев И. В.

Заместители главного редактора:
доктор физико-математических наук
Логинов Ю. Ю.

доктор физико-математических наук
Сенашов С. И.

доктор технических наук
Михеев А. Е.

кандидат технических наук
Зеленков П. В. (отв. секретарь)

Редакционная коллегия:
Аплеснин С. С.
Головенкин Е. Н.
Ерыгин Ю. В.
Краев М. В.
Лаптенок В. Д.
Ловчиков А. Н.
Медведев А. В.
Москвичев В. В.
Сафонов К. В.
Смирнов Н. А.
Сомов В. Г.

Учредитель
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2011
© Коллектив авторов, 2011

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

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

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

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

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (http: //www.elibrary.ru) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)
Журнал включен в каталоги:
российской прессы «Роспечать» (МАП) – 11399;
объединенный «Пресса России» – 39263

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

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

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

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

Редакторы Т. Е. Ильющенко, К. С. Мирошникова, Е. Г. Некрасова, О. А. Плехова
Редактор английского текста Е. А. Гончаров
Компьютерная верстка М. А. Белоусовой
Подп. в печать 06.09.2011. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 29,0.
Уч.-изд. л. 37,5. Тираж 1000 экз. С 124/11. Заказ 87/94.
Редакционно-издательский отдел
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Отпечатано в типографии ИП Суховольской Ю. П.
660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 2.

Раздел
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 681.3

E. A. Engel, I. V. Kovalev

INFORMATION PROCESSING USING INTELLIGENT ALGORITHMS BY SOLVING WCCI 2010 TASKS

The article focused on the urgent problem of selection of strategies to deal with ill-structured problems involving the processing of both quantitative and qualitative data, high dimensionality and omissions in the data.

This article provides a detailed analysis of the prediction models for data processing. Experiments confirm the effectiveness of intelligent algorithms, developed by the authors.

Keywords: data processing, ill-structured problem, intelligent algorithms.

Classification problems are found in many application domains, including classification of images or videos, speech recognition, medical diagnosis, marketing, and text categorization.

The category identifiers are referred to as „labels“. Predictive models capable of classifying new instances (correctly predicting their labels) usually require „training“, or parameter adjustment, with large amounts of labeled training data (pairs of examples of instances and associated labels). Unfortunately, few labeled training data may be available due to the cost or burden of manually annotating data. Labeling data is not only expensive, it is tedious. In recent years, Amazon Mechanical Turk and other crowd-sourcing platforms have emerged as a way of rapidly labeling large datasets. However, these are not appropriate for personal or sensitive data. To help us quickly tag our personal pictures, videos, and documents, we need systems that can learn with very few training examples. „Active learning“ helps reducing the burden of labeling by letting the learning machine query only the examples for which the labels are informative.

Following the seminal work in multi-task learning [1], there has been considerable progress in the past decade in developing cross-task transfer using both discriminative and generative approaches in a wide variety of settings [2]. These approaches include multi-layer structured learning machines from the „Deep Learning“ family (Convolutional neural networks, Deep Belief Networks, Deep Boltzmann Machines) [3–6], sparse coding [7–8], and matrix factorization methods, metric or kernel learning methods [9–13]. „Learning to learn“ new concepts [14] is a promising area of research in both machine learning and cognitive science revolving around these ideas. Important progress has also been made in purely unsupervised learning [15–19].

Brief overview of Unsupervised and Transfer Learning. Intelligent beings commonly transfer previously learned knowledge to new domains, making them capable of learning new tasks from very few examples. In contrast, many approaches to machine learning have been focusing on „brute force“ supervised learning from massive amounts of labeled data. While this approach is practical when such data are available, it does not apply when the available training data are mostly unlabeled. Furthermore, even when large amounts of labeled data are available, some categories may be underrepresented. There are many applications for which it would be desirable to learn from very few examples, including just one (one shot learning). The classification accuracy of classifiers trained with very few examples largely depends on the quality of the data representation.

In their review, Pan and Yang [2] give the following definitions: Semi-supervised learning addresses the problem that the labeled data may be too scarce to build a good classifier, by making use of a large amount of unlabeled data and a small amount of labeled data. Transfer learning, in contrast, allows the domains, tasks, and distributions used in training and testing to be different. Transfer learning systems recognize and apply knowledge and skills learned in previous tasks to novel tasks.

Within this framework, there are a variety of settings [2], depending on whether:

– labels are available in the source domain and/or the target domain;

– the tasks are the same or different in the source domain and target domain.

Figure 1, adapted from [2], represents the various situations addressed in the literature.

Unsupervised methods provides an array of possibilities for learning new representations, including:

1) dimensionality reduction or manifold learning;

2) clustering;

3) latent variable or generative models learning.

Principal Component Analysis (PCA), is a method of (linear) projection into a subspace of lower dimension spanned by the eigenvectors of the covariance matrix corresponding to the largest eigenvalues. By construction, the basis vectors in PCA are orthogonal. Other methods for linear dimensionality reduction compute basis vectors in a different way. For instance, Independent Component Analysis (ICA) seeks basis vectors that are independent. Both PCA and ICA can be „kernelized“, to obtain non-linear transformations. Other methods seek transformations into lower dimensional spaces that preserve the local topology (e. g., Kohonen maps, MDS, Isomap, LLE, Laplacian Eigenmaps). Many such methods can be regrouped under the general framework of „regularized principal manifolds“ [15–16] or graphical latent variable models [18]. Among clustering methods [20], *k*-means clustering is the simplest and most widely used.

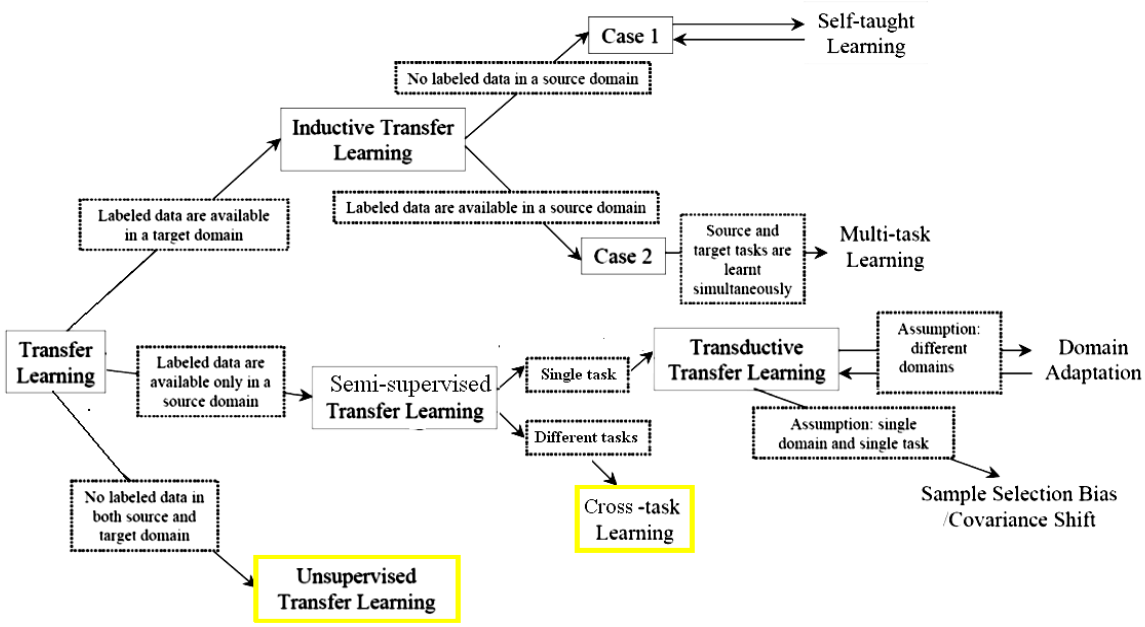


Fig. 1. A taxonomy of transfer learning settings

Starting from k randomly selected cluster centers, it iteratively refines the position of the centers by alternating two steps: (1) forming clusters by assigning examples to their closest cluster center, and (2) re-computing each cluster center by averaging the examples in each cluster. There are many methods related to k-means, which model overlapping clusters, including Gaussian mixtures and fuzzy C-means. One way of exploiting clustering for feature construction is to associate each cluster center with a feature that measures the similarity of the example to that cluster center. While k-means and related methods seek a „shallow“ latent structure in data, hierarchical clustering instead works under the assumption that clusters may be organized in a (deep) hierarchy. The most commonly used hierarchical methods recursively group clusters starting from single examples (bottom up agglomerative methods). Other methods of clustering include graph partitioning and spectral clustering [19].

The successful application of „shallow“ architectures, like kernel methods, has driven away the focus of attention from multi-layer structures (multi-layer neural networks, Deep Belief Networks, Deep Boltzmann Machines, and deep Bayesian latent variable models), which could potentially learn more accurate classifiers for more complex problems, but are more difficult to optimize. However, one of the recent developments in Deep Learning research has been the invention of new algorithms for learning internal representations using unsupervised learning [4–6]. A simple neural network implementation of PCA is the linear „autoencoder“: a three layer neural network of neurons having a linear activation function, in which the output layer tries to reproduce the input layer and the hidden units learn the top principal components by least-square optimization.

Transfer Learning may address in one of two ways:

1) metric, similarity or kernel learning;

2) data representation learning.

There is a wide variety of methods of metric learning or similarity learning (see e. g., [12–13], for a review). We use the notion similarity learning, for algorithms that learn a similarity matrix, which is symmetric but not necessarily.

While kernel learning has been developed relatively recently [10; 11], methods for similarity learning with neural networks have been in use for almost two decades. The idea [9] is to use two replicas of the same neural network, constrained to share parameters. The inputs to the two neural networks are two instances to be compared. The outputs of the networks are combined with a simple parameter-free similarity function such as the cosine of the two output vectors to provide a similarity score. The network is trained to give a large similarity score to examples of the same class and a low score to examples of different classes. Data representation learning is also a landmark of neural networks: in transfer learning, data representations obtained by learning a source task may be re-used in full or in parts to train a system on a target task [5].

Evaluation. *Score: the Area under the Learning Curve.* A learning curve plots the AUC as a function of the number of training examples. We consider two baseline learning curves:

– the ideal learning curve, obtained when perfect predictions are made (AUC = 1). It goes up vertically then follows AUC = 1 horizontally. It has the maximum area „Amax“;

– the „random“ learning curve, obtained by making random predictions (expected value of AUC: 0,5). It follows a straight horizontal line. Its area „Arand“.

To obtain ranking score, we normalize the ALC as follows:

$$globalscore = (ALC - Arand)/(Amax - Arand).$$

We interpolate linearly between points. The score depends on how we scale the *x*-axis. We use a log2 scaling.

Classifier used. We use a linear discriminat classifier to evaluate the quality of the data representations. Denoting by $w = [w_1;w_2; : : : ;w_n]$ the parameter vector of the model, classification is performed using the discriminant function

$$f(x) = w \cdot x. \quad (1)$$

If a threshold is set, patterns having a discriminant function value exceeding the threshold are classified in the positive class. Otherwise they are classified in the negative class. The weights w_i are computed as the difference between the average of feature x_i for the examples of the positive class and the average of feature x_i for the examples of the negative class.

The Area under the ROC Curve (*AUC*). The AUC is the area under the curve plotting *sensitivity* vs. (1 – *specificity*) when the threshold θ is varied (or equivalently the area under the curve plotting *sensitivity* vs. *specificity*).

The results of classification, obtained by thresholding the prediction score, may be represented in a confusion matrix (Table 1), where *tp* (true positive), *fn* (false negative), *tn* (true negative) and *fp* (false positive) represent the number of examples falling into each possible outcome. We define the sensitivity (also called true positive rate or hit rate) and the specificity (true negative rate) as:

$$Sensitivity = tp/pos;$$
$$Specificity = tn/neg$$

where $pos = tp + fn$ is the total number of positive examples and $neg = tn + fp$ the total number of negative examples.

Table 1

Confusion matrix

Truth		Prediction	
		Class + 1	Class – 1
	Class + 1	*tp*	*fn*
	Class – 1	*fp*	*tn*

We then estimate the standard deviation of the *BAC* as

$$\sigma = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{p_+(1-p_+)}{pos} + \frac{p_-(1-p_-)}{neg}}, \quad (2)$$

where *pos* is the number of examples of the positive class, *neg* is the number of examples of the negative class, and p_+ and p_- are the probabilities of error on examples of the positive and negative class respectively, approximated by their empirical estimates, the *sensitivity* and the *specificity* (see Figure 2) [21].

Experimental Results. The modified neural network [22] solves practical tasks in various subject fields. To investigate the generality of the modified artificial neural network we solved in different domains: handwriting recognition, marketing and chemoinformatics. This section reports the results of numerical experiments which indicate, that algorithms proposed by author [22–24] has appropriate generalization accuracy.

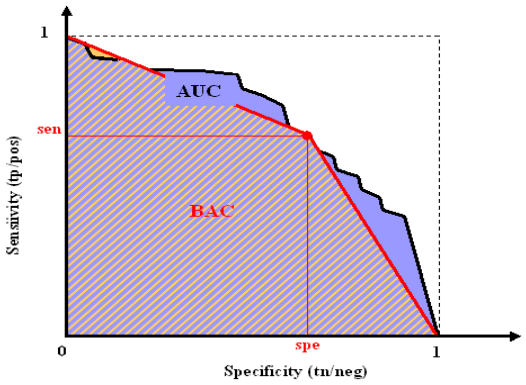


Fig. 2. The Area under the ROC Curve (AUC)

Handwriting recognition: IBN_SINA. Historical archive collections are difficult to process by traditional Optical Character Recognition (OCR) methods, due to their historical character types or due to the fact that the material is handwritten and uses scripts that are no longer in use. There are thousands of different scripts in use worldwide and large volumes of scanned documents waiting to be indexed to facilitate retrieval. Transfer learning methods could accelerate the application of handwriting recognizers by reducing the need for using human experts to label data.

IBN_SINA is a handwriting recognition dataset. The task of IBN_SINA is to spot arabic words in an ancient manuscript to facilitate indexing. The data were formatted in a feature representation (92 variables).

The task of IBN_SINA solved by using the modified neural network with detector-descriptor scheme as preprocessing step [23]. First we obtain database using detector-descriptor scheme on the IBN_SINA database. For detector and descriptor we using the testing software provided by Mikolajczyk. The matching is carried out as follows. There were 1000 3-layer modified artificial neural networks (33 hidden units: 30 and 3 units at 1st and 2nd hidden layer respectively) trained on the preprocessing IBN_SINA database. Our ranking is 8, done according to the Score and compare with the WCCI results on IBN_SINA (Table 2).

The preprocessing step with detector-descriptor scheme increased Score of modified artificial neural network from 0.913152 to 0.977364.

ORANGE. ORANGE is a marketing dataset. Customer Relationship Management (CRM) is a key element of modern marketing strategies. This dataset was extracted from a large marketing database from the French Telecom company Orange.

The goal is to predict the propensity of customers to switch provider (churn), buy new products or services (appetency), or buy upgrades or add-ons proposed to them to make the sale more profitable (up-selling).

Table 2

Ranking on WCCI 2010 tasks

Ranking	IBN_SINA Score (AUC)	ORANGE Score (AUC)	HIVA Score (AUC)
1	0,990 445	0,810 102	0,947 128
2	0,988 359	0,721 316	0,884 041
3	0,983 816	0,813 333	0,812 109
4	0,978 695	0,787 346	0,793 947
5	0,977 876	0,788 271	0,784 561
6	0,97 781	0,78 821	0,770 527
7	0,977 415	0,787 634	0,769 719
8	0,977 364	0,787 244	0,711 866
9	0,977 071	0,813 333	0,681 118

The difficulties include heterogeneous noisy data (numerical and categorical variables), and unbalanced class distributions. We provide below the list of categorical variables:

3 10 16 25 27 32 33 47 49 59 65 73 75 76 79 81 88 96 98 100 105 112 113 121 128 132 138 140 141 148 152 153 154 167 173 181 187 194 209 216.

The task of ORANGE solved by using the fuzzy neural network [24]. First we obtain database using numerical representation of categorical variables on the ORANGE database. There were 1000 4-layer fuzzy neural networks (53 hidden units: 40, 10 and 3 units at 1st, 2nd and 3nd hidden layer respectively) trained on the preprocessing ORANGE database. Our ranking is 7, done according to the Score and compare with the WCCI results on ORANGE (Table 2).

Experimental results show that fuzzy neural network performs quite well compare to other algorithms.

HIVA. HIVA is a chemoinformatics dataset. The task of HIVA is to predict which compounds are active against the AIDS HIV infection. The original data has 3 classes (active, moderately active, and inactive). We brought it back to a two-class classification problem (active vs. inactive). We represented the data as 1617 sparse binary input variables. The variables represent properties of the molecule inferred from its molecular structure. The problem is therefore to relate structure to activity (a QSAR = quantitative structure-activity relationship problem) to screen new compounds before actually testing them (a HTS = high-throughput screening problem).

The original data were made available by The National Cancer Institute (USA). The 3d molecular structure was obtained by the CORINA software and the features were derived with the ChemTK software.

The HIVA dataset was used previously in the Performance Prediction challenge, the Model Selection game, and the Agnostic Learning vs. Prior Knowledge (ALvsPK) challenge. A variant of the HIVA dataset called SIDO was used in the Causation and Prediction challenge and the Pot-Luck challenge.

The task of HIVA solved by using the modified neural network [22]. There were 1000 3-layer modified artificial neural networks (57 hidden units: 50 and 7 units at 1st and 2nd hidden layer respectively) trained on the HIVA database. Our ranking is 5, done according to the Score and compare with the WCCI results on HIVA (Table 2).

Experimental results show that fuzzy neural network performs very well compare to other algorithms.

We have investigated algorithms proposed by author [22–24] which fulfills the optimal complex and cross-validated model. Our analysis was based on object recognition and classification tasks. The algorithms developed by author applied to solved tasks in different domains: handwriting recognition, marketing and chemoinformatics. Experimental results show that:

– the modified artificial neural network effectively solves practical tasks of various subject fields and performs very well compare to the popular learning algorithms and advisable to gain extra prediction accuracy;

– the fuzzy neural network have done well to predict performance of tasks with categorical variables;

– at handwriting recognition tasks [23] the detector-descriptor scheme as preprocessing step significantly improve performance of modified artificial neural network.

References

1. Caruana R. Multitask learning // Machine Learning. 1997. Vol. 28. № 1. P. 41–75.

2. Pan S. J., Yang Q. A survey on transfer learning // IEEE Trans. on Knoweledge and Data Engineering. 2010. Vol. 22. № 10. P. 1345–1359.

3. Collobert R., Weston J. A unified architecture for natural language processing: Deep neural networks with multitask learning // Intern. Conf. on Machine Learning (ICML). 2008. P. 160–167.

4. Bengio Y. Learning deep architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. 2009. Vol. 2. № 1. P. 1–127.

5. Gutstein S. M. Transfer learning techniques for deep neural nets : Ph. D. dissertation. The University of Texas at El Paso, 2010.

6. Why does unsupervised pre-training help deep learning? / D. Erhan, Y. Bengio, A. Courville et al. // JMLR. 2010. Vol. 11. P. 625–660.

7. Efficient sparse coding algorithms / H. Lee, A. Battle, R. Raina, A. Y. Ng // Advances in Neural Information Processing Systems. 2007. Vol. 19. P. 801–808.

8. Self-taught learning: Transfer learning from unlabeled data / R. Raina, A. Battle, H. Lee et al. // Proc. of the Twenty-fourth Intern. Conf. on Machine Learning, 2007. P. 759–766.

9. Signature verification using a “siamese” time delay neural network / J. Bromley, I Guyon., Y. LeCun et al. // NIPS. 1993. P. 737–744.

10. Learning the kernel matrix with semi-definite programming // G. Lanckriet, N. Cristianini, P. Bartlett, L. E. Ghaoui // J. of Machine Learning Research. 2004. Vol. 5. P. 27–72.

11. Weinberger K. Q., Saul L. K. Distance metric learning for large margin nearest neighbor classification // J. Machine Learning Research. 2009. Vol. 10 P. 207–244.

12. Yang L., Jin R. Distance metric learning: A comprehensive survey [Electronic resource] : Techn. Rep. Michigan State University. 2006. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.91.4732 (data of visit: 30.07.2011).

13. Yang L. An overview of distance metric learning [Electronic resource] : Techn. Rep. Carnegie Mellon University. 2007. URL: http://www.cs.cmu.edu/~liuy/dist_overview.pdf (data of visit: 30.07.2011).

14. Learning to Learn / S. Thrun, L.Y. Pratt (ed.). Boston, MA : Kluwer Academic Publishers, 1998.

15. Regularized principal manifolds / A. J. Smola, S. Mika, B. Schlkopf, R. C. Williamson // JMLR. 2001. Vol. 1. P. 179–209.

16. Out-of-sample extensions for LLE, Isomap, MDS, Eigenmaps, and Spectral Clustering / Y. Bengio, J.-F. Paiement, P. Vincent et al. // NIPS. 2003. P. 177–184.

17. Globerson A., Tishby N. Sufficient dimensionality reduction // J. Machine Learning Research. 2003. Vol. 3. P. 1307–1331.

18. Ghahramani Z. Unsupervised Learning // Advanced Lectures in Machine Learning. Lecture Notes in Computer Sci. Berlin : Springer-Verlag, 2004. Vol. 3176. P. 72–112.

19. Luxburg U. A tutorial on spectral clustering // Statistics and Computing. 2007. Vol. 17. P. 395–416.

20. Jain A. K., Murty M. N., Flynn P. J. Data clustering : A review ACM Computing Surveys. 1999. P. 264–323.

21. Performance prediction challenge / I. Guyon, A. Saffari, G. Dror, J. Buhmann // IEEE/INNS conf. IJCNN 2006. Vancouver, Canada, July 16–21. 2006. P. 1649–1656.

22. Engel E. A. Modified artificial neural network for information processing with the selection of essential connections : Ph. D. thesis. Krasnoyarsk, 2004.

23. Engel E. A. Graphic information processing using intelligent algorithms // Vestnik. Sci. J. of Siberian State Aerospace Univ. № 4(25). 2009. P. 85–90.

24. Engel E. A. The hierarchical model of decision-making based on fuzzy neural networks for information processing, Vestnik. Sci. J. of Siberian State Aerospace Univ. № 1 (33). 2011. P. 83–86.

Е. А. Энгель, И. В. Ковалев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ WCCI 2010

Рассмотрена актуальная проблема выбора стратегии решения слабоформализованных задач, предполагающих обработку как количественных, так и качественных данных, высокую размерность и пропуски в данных.

Представлен детальный анализ моделей прогноза для обработки данных. Эксперименты подтверждают эффективность интеллектуальных алгоритмов, разработанных авторами.

Ключевые слова: обработка данных, слабоформализованные задачи, интеллектуальные алгоритмы.

© Engel E. A., Kovalev I. V., 2011

УДК 517.95

M. B. Frost

DETERMINING THE SOURCE OF TRANSVERSE OSCILLATIONS OF AN ELASTIC ROD

Solvability of an inverse problem for the equations of transverse oscillations of an elastic rod (determining the source of oscillations on the basis of the rod deflection at the final time) is proved.

Keywords: elastic rod, inverse problem, source of oscillations, solvability.

Many issues of engineering, geophysics, and medicine involve problems whose sought quantities are elements of initial-boundary problems for differential equations. These unknown elements are determined on the basis of additional information. Such problems are called inverse problems for differential equations. The advanced theory of inverse problems and numerous publications can be found in [1].

Let us consider an inverse problem of determining the source of transverse oscillations of an elastic rod. The initial-boundary problem of transverse oscillations of a simply supported rod with a constant cross section and a

length l under the action of a distributed load $q(x,t)$ is posed [2] as follows:

$$u_{tt} + a^2 u_{xxxx} = q(x,t), \quad (1)$$

$$u(x,0) = m(x),\ u_t(x,0) = n(x), \quad (2)$$

$$u(0,t) = u(l,t) = u_{xx}(0,t) = u_{xx}(l,t) = 0, \quad (3)$$

Here, $u = u(x,t)$, $0 \le x \le l$, $0 \le t \le T$ is the deflection, a is a constant, $m(x)$ and $n(x)$, $0 \le x \le l$ are given functions satisfying the conditions

$$m(0) = n(0) = m(l) = n(l) = 0. \quad (4)$$

Let us consider an inverse problem of determining the source of oscillations. We assume that

$$q(x,t) = \omega(t)\lambda(x), \quad (5)$$

where $\omega(t)$, $0 \le t \le T$, is a known function of time, and $\lambda(x)$, $0 \le x \le l$ is an unknown function determined with the use of an additional condition (deflection at the final time $t = T$):

$$u(x,T) = p(x),\ 0 \le x \le l,\ p(0) = p(l) = 0,\ T > 0. \quad (6)$$

We integrate Eq. (1) with respect to t from 0 to t, and then from 0 to T. Taking into account equalities (2–5), we obtain

$$p(x) - m(x) - Tn(x) + a^2 \int_0^T \left(\int_0^t u_{xxxx}(x,\tau)\,d\tau \right) dt = \lambda(x) \int_0^T \left(\int_0^t \omega(\tau)\,d\tau \right) dt. \quad (7)$$

Let us assume that

$$h \equiv \int_0^T (T-\tau)\omega(\tau)\,d\tau \ne 0. \quad (8)$$

Then, equality (7) yields

$$\lambda(x) = h^{-1} \left(p(x) - m(x) - Tn(x) + a^2 \int_0^T (T-\tau) u_{xxxx}(x,\tau)\,d\tau \right). \quad (9)$$

Substituting Eq. (9) into Eq. (1), we obtain

$$u_{tt} + a^2 u_{xxxx} - h^{-1} a^2 \omega(t) \int_0^T (T-\tau) u_{xxxx}(x,\tau)\,d\tau = h^{-1} \left(p(x) - m(x) - Tn(x) \right) \omega(t). \quad (10)$$

Thus, the problem of determining the function $u(x,t)$ is reduced to the initial-boundary problem for the loaded equation of oscillations (10) under conditions (2–4). In this case, condition (6) is satisfied automatically. The function $\lambda(x)$, $0 \le x \le l$ is then determined from equality (9).

Let us study solvability of the initial-boundary problem (10), (2–4) under the following assumptions:

– the function is $\omega(t) > 0$ (or $\omega(t) < 0$) for $0 < t < T$, $\omega(0) = 0$, $\omega(T) \ne 0$; the function $\omega(t)$ is continuously differentiable on $[0,T]$;

– the following expansions are valid:

$$m(x) = \sum_{k=1}^{\infty} m_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right),\ |m_k| < \frac{m^*}{k^{7+\varepsilon}};$$

$$n(x) = \sum_{k=1}^{\infty} n_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right),\ |n_k| < \frac{n^*}{k^{5+\varepsilon}}; \quad (11)$$

$$p(x) = \sum_{k=1}^{\infty} p_k \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right),\ |p_k| < \frac{p^*}{k^{7+\varepsilon}}$$

(ε, m^*, n^* and p^* are positive constants).

We seek for the solution of problem (10), (2–4) by the Fourier method of separation of variables in the form

$$u(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right). \quad (12)$$

Substituting Eq. (12) into Eq. (10) and taking into account Eq. (2), (11), we obtain an infinite system of ordinary differential equations with initial conditions for the functions $U_k(t)$, $k = 1,2,\ldots$:

$$\frac{d^2 U_k}{dt^2} + \mu_k^2 U_k(t) = e_k \omega(t).\ k = 1,2,\ldots, \quad (13)$$

$$U_k(0) = m_k,\ \left.\frac{dU_k}{dt}\right|_{t=0} = n_k,\ \mu_k = \frac{ak^2\pi^2}{l^2}, \quad (14)$$

$$e_k = h^{-1}\left(p_k - m_k - n_k T\right) + h^{-1}\mu_k \int_0^T U_k(\tau)(T-\tau)\,d\tau. \quad (15)$$

Solving Eq. (13) with the initial condition (14) for $k = 1,2,\ldots$, we obtain

$$U_k(t) = \frac{e_k}{\mu_k} \int_0^t \omega(\tau) \sin\left(\mu_k (t-\tau)\right) d\tau + m_k \cos(\mu_k t) + \frac{n_k}{\mu_k} \sin(\mu_k t). \quad (16)$$

Let us use $t = T$, $U_k(t) = p_k$ in Eq. (16) and assume that

$$\omega_k \equiv \int_0^T \omega(\tau) \sin\left(\mu_k (T-\tau)\right) d\tau \ne 0,\ k = 1,2,\ldots. \quad (17)$$

The following equality is valid:

$$e_k = \frac{\mu_k}{\omega_k} \left(p_k - m_k \cos(\mu_k T) - \frac{n_k}{\mu_k} \sin(\mu_k T) \right). \quad (18)$$

As $\mu_k \to \infty$ with $k \to \infty$, then, by virtue of the assumptions made for the function $\omega(t)$, we obtain [3] for large values of k

$$|\omega_k| \sim \frac{l^2 \omega(T)}{a\pi^2 k^2}. \quad (19)$$

Therefore, the series determining the function $u(x,t)$ by equality (12) with allowance for Eqs. (16, 18, 19), is absolutely converging, and it can be differentiated four times with respect to x and two times with respect to t. It satisfies Eq. (10) and conditions (1–4).

This solution is unique in the class of functions that admit twofold differentiation with respect to t and fourfold differentiation with respect to x. The function $\lambda(x)$ for $0 \le x \le l$ is uniquely determined by equality (9) in the form of an absolutely converging series

$$\lambda(x) = \sum_{k=1}^{\infty} e_k \sin\frac{k\pi x}{l}.$$

Equality (6) is also satisfied. The constructed functions $u(x,t)$ and $\lambda(x)$ uniquely determine the solution of the inverse problem (1–6).

Note that condition (17) is always satisfied for the linear function $\omega(t) = \alpha t$ for $0 \le t \le T$, where α is a constant, because

$$1 - \frac{\sin(\mu_k T)}{\mu_k T} > 0 \text{ for all } \mu_k,\ k = 1,2,...$$

The algorithm of the numerical solution of problem (1–6) can be constructed as follows. Let $n = 0,1,2,...$ be the number of the iteration. We seek for the function $u^n(x,t)$ numerically, using the grid technique or the finite-element method [4] to solve the equation of rod oscillations with a known right side determined via the function $u^{n-1}(x,t)$

$$u_{tt}^n + a^2 u_{xxxx}^n = \frac{a^2}{h}\omega(t)\int_0^T u_{xxxx}^{n-1}(x,\tau)(T-\tau)d\tau + \\ + h^{-1}\left(p(x) - m(x) - Tn(x)\right)\omega(t), \qquad (20)$$

and satisfying conditions (2–4). An arbitrary function satisfying conditions (2–4) can be used as the initial approximation. The calculations are performed until

$$\int_0^l \left(\int_0^T \left(u_{xxxx}^n(x,\tau) - u_{xxxx}^{n-1}(x,\tau)\right)(T-\tau)d\tau \right)^2 dx < \delta,$$

where δ is an arbitrary, rather small number.

This condition means a small value of the integral

$$\int_0^l \left(\lambda^n(x) - \lambda^{n-1}(x)\right)^2 dx,$$

where $\lambda^n(x)$ is calculated via $u^n(x,\tau)$ by Eq. (9).

In conclusion, we can mention that the Fourier method can be used in a similar manner to prove unique solvability of the inverse problem of determining the source of oscillations of an elastic rectangular constant-thickness plate with sides a and b, which is simply supported on its edges. In this case, $u = u(x,y,t)$, $0 \le x \le a$, $0 \le y \le b$, $0 \le t \le T$; u_{xxxx} in Eq. (1) should be replaced by a biharmonic operator $\Delta^2 u$ for the variables x and y [5]; the transverse load should be taken in the form $q(x,y,t) = \omega(t)\lambda(x,y)$, where $\omega(t)$ is a known function of time and $\lambda(x,y)$ is an unknown function of coordinates, which is determined from the known value of the deflection at the final time $t = T$.

An inverse problem for the equation of transverse oscillations of an elastic rod with a constant cross section (determining the source of oscillations on the basis of the deflection at the final time) is considered in the paper. The problem is reduced to solving an initial-boundary problem for the loaded equation of oscillations containing a functional of the solution. Unique solvability of the initial-boundary problem for the loaded equation and then of the inverse problem is proved by the Fourier method. An algorithm of the numerical solution of the inverse problem is proposed.

References

1. Prilepko A. J., Orlovsky D. G., Vasin J. A. Methods for solving inverse problems in mathematical physics. Monographs and textbooks in pure and applied mathematics. N.-Y. : M. Dekker, 2000.

2. Krylov A. N. On some differential equations of mathematical physics, which have engineering applications. M.–L. : Gos. Izdat. Tekhn. – Teor. Lit., 1950.

3. Kopson E. T. Asymptotic Expansions. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1965.

4. Basov K. A. Ansys in Examples and Problems. M. : Computer Press, 2002.

5. Panovko Ya. G. Fundamentals of the Applied Theory of Oscillations and Impacts. L. : Politekhnika, 1990.

М. Б. Фрост

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Рассмотрена задача определения источника поперечных колебаний упругого стержня по дополнительной информации – значению прогиба в финальный момент времени.

Ключевые слова: упругий стержень, обратная задача, источник поперечных колебаний, разрешимость.

© Frost M. B., 2011

УДК 62.503.51

Е. Д. Агафонов, Ю. В. Смешко

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВНОЙ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Рассматривается задача управления нелинейным статическим объектом с использованием вероятностных моделей, основанных на непараметрическом оценивании условной плотности распределения вероятности. Значения входной величины объекта, обеспечивающей желаемое состояние на выходе, определяются в результате оптимизации оценки условной плотности. Предложены подходы к решению задач оптимизации и настройки алгоритма управления.

Ключевые слова: вероятностная модель, непараметрическая оценка условной плотности распределения вероятности, управление статическим объектом, оптимизация.

Описывается один подход к решению задачи управления стохастическим статическим объектом с одним входом и одним выходом. Предполагается, что параметрическая структура модели объекта и законы распределения помех неизвестны. Информация об объекте управления содержится в выборках измерений «вход-выход».

Под управлением понимается процесс выведения объекта в требуемое состояние посредством выбора соответствующего входного воздействия. В классической теории управления, как правило, рассматриваются задачи управления динамическими процессами. Однако на практике достаточно часто встречаются объекты, описание которых в виде системы дифференциальных, интегро-дифференциальных или конечно-разностных уравнений невозможно по тем или иным причинам. Например, такая ситуация может возникнуть из-за несовершенства средств контроля входных и выходных величин, недостатка измерений для анализа «динамики» процесса или сложности описания переходных процессов, происходящих в объекте. В этих случаях исследователь вынужден рассматривать объект как статический с запаздыванием.

Постановка задачи управления предполагает наличие, во-первых, некоторой модели объекта и, во-вторых, цели управления. Анализ задач управления статическим объектом показывает, что основными типами целей управления являются: а) стабилизация выхода объекта, т. е. приближение выхода объекта к желаемому значению с заданной точностью; б) оптимизация выхода объекта, т. е. приближение некоторой скалярной функции выхода к своему минимальному (максимальному) значению с заданной точностью [1]. Формально задачи оптимизации можно свести к задачам стабилизации, и наоборот.

Один из подходов к решению задачи управления статическим объектом предполагает построение так называемой инверсной модели объекта [2]. Например, для объекта с одним входом и одним выходом основной инверсной характеристикой является регрессия. На основе использования непараметрических оценок инверсных регрессий в дальнейшем строятся алгоритмы адаптивного управления при априорной неопределенности.

Однако построенная таким образом инверсная модель не способна учитывать многозначность получаемых характеристик «выход-вход» объекта. На практике зачастую мы имеем дело с неоднозначностью в выборе управляющего входного воздействия, приводящего объект управления к желаемому состоянию. Кроме того, различные альтернативы могут существенно различаться по стоимости или степени целесообразности их реализации. Целью настоящего исследования является повышение эффективности управления статическим объектом, учитывая проблему многозначности характеристик в процессе выбора управляющего воздействия.

Пусть объект управления относится к классу нелинейных статических с одним входом и одним выходом (рис. 1):

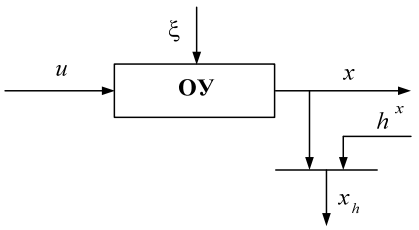


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

На рисунке приняты следующие обозначения: ОУ – объект управления, u – входная переменная объекта, x – выходная переменная объекта, ξ – случайное воздействие на объект, h^x – аддитивная помеха в канале измерения выходной переменной ($M\{h^x\} = 0, D\{h^x\} < \infty$).

Имеется выборка статически независимых наблюдений входной и выходной величин $\{u_i, x_i\}, i = 1, 2, ..., s$. Требуется решить задачу стабилизации, т. е. найти такое управляющее воздействие, которое приводит к желаемому значению выходную переменную. Таким образом, необходимо по имеющимся априорным сведениям и выборке измерений $\{u_i, x_i\}$ отыскать множество $\{u_j\}$, для которого справедливо $x(u_j) \approx x^*, (j = 1, 2, ...)$.

Для решения поставленной задачи предлагается подход, основанный на построении вероятностной модели объекта, которая может быть получена путем непараметрического оценивания условной плотности распределения вероятности [3]. Затем задача сводится к нахождению мод условного распределения, т. е. наиболее вероятных значений входной переменной при условии фиксированной выходной переменной. В частности, в непрерывном случае необходимо отыскать максимумы условной плотности распределения вероятности. Так как рассматриваются многозначные характеристики, следовательно, желательно оценить все локальные моды оценки условной плотности. Таким образом, искомое множество значений входной величины $\{u_j\}$ определяется в результате решения задачи оптимизации:

$$\hat{f}(u \mid x = x^*) \to \max_u. \qquad (1)$$

Схематически процесс управления объектом представлен на рис. 2.

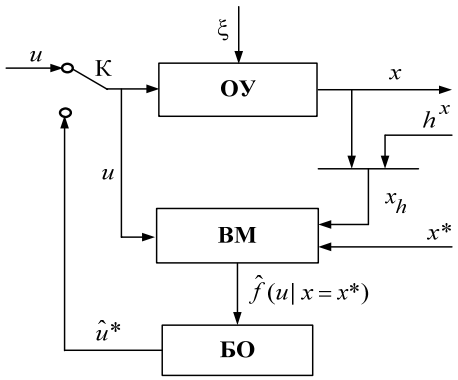


Рис. 2. Структурная схема процесса управления

На рисунке к введенным ранее обозначениям добавляются следующие: ВМ – вероятностная модель объекта управления, БО – блок оптимизации построенной оценки, x^* – желаемое значение выходной величины, $\hat{f}(u \mid x = x^*)$ – оценка условного распределения, $\hat{u}^*$ – управляющее воздействие, К – переключатель, переводящий систему из режима накопления информации в режим управления.

Условная плотность распределения вероятности $f(u \mid x)$ является наиболее полной характеристикой, устанавливающей связь между случайными величинами X и U. Зная её, можно вычислить любые другие условные характеристики объекта [2; 4; 5]. Условная плотность выражается через безусловные плотности из формулы умножения плотностей:

$$f(u \mid x) = f(u, x) / f(x). \qquad (2)$$

В [2; 4] предлагалось заменить безусловные плотности в (2) непараметрическими оценками плотности Розенблатта–Парзена [5; 6]. В результате получаем непараметрическую оценку условной плотности распределения вероятности:

$$\hat{f}(u \mid x = x^*) = \frac{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{c_{s_x}}K\left(\frac{x^* - x_i}{c_{s_x}}\right)\frac{1}{c_{s_u}}K\left(\frac{u - u_i}{c_{s_u}}\right)}{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{c_{s_x}}K\left(\frac{x^* - x_i}{c_{s_x}}\right)} = \frac{\frac{1}{c_{s_u}}\sum_{i=1}^{s}K\left(\frac{x^* - x_i}{c_{s_x}}\right)K\left(\frac{u - u_i}{c_{s_u}}\right)}{\sum_{i=1}^{s}K\left(\frac{x^* - x_i}{c_{s_x}}\right)}, \qquad (3)$$

где $K(z)$ – ядерная функция, удовлетворяющая следующим условиям:

$$1)\ K(z) < \infty, \forall z \in K(z), \quad 2)\ \int_{\Omega(z)} K(z)dz = 1, \quad 3)\ \int_{\Omega(z)} K^2(z)dz < \infty. \qquad (4)$$

Оценка (3) включает параметры c_{s_u} и c_{s_x}. Параметр c_{s_u} определяет ширину диапазона, в котором наиболее вероятно наблюдаются искомые значения входной переменной, при этом варьирование значения c_{s_u} в широких границах не оказывает существенного влияния на точность получаемых результатов. Параметр отвечает по большей части за «степень размытия» мод непараметрической оценки условной плотности распределения.

Значение c_{s_x} определяет степень «гладкости» оценки в целом. «Гладкая» оценка облегчает оптимизацию критерия (1), однако при этом может снижаться точность отыскания искомого управления. Чрезмерное сглаживание приводит к исчезновению некоторых существенных локальных максимумов критериальной функции. Вместе с тем c_{s_x} определяет точность выполнения условия $x = x^*$, поэтому увеличение c_{s_x} приводит к снижению точности достижения цели управления.

Для обеспечения надежности нахождения решений предлагается осуществить переход от исходной выборки наблюдений входных и выходных величин к новой выборке, заданной в узлах «равномерной сетки» в пространстве входных переменных. Такой переход достижим различными способами, в частности, с применением непараметрической оценки регрессии.

Исходная выборка наблюдений входной и выходной величин обозначается $\{u_i, x_i\}, i = 1, 2, ..., s.$ Задаём «равномерную сетку» в пространстве входных переменных с количеством узлов $\tilde{s}$. Шаг дискретизации для сетки вычисляется следующим образом:

$$\Delta u_j = \frac{\max_i\{u_i\} - \min_i\{u_i\}}{\tilde{s}}; i = 1, 2, ..., s; j = 1, 2, ..., \tilde{s}. \qquad (5)$$

Вычисляем новые «выборочные» значения $\{\tilde{u}_j, \tilde{x}_j\}, j = 1,2,...,\tilde{s}$ по формулам

$$\tilde{u}_j = \min_i \{u_i\} + j\Delta u_j;$$

$$\hat{x}(u_j) = \tilde{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i K\left(\frac{\tilde{u}_j - u_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} K\left(\frac{\tilde{u}_j - u_i}{c_s}\right)}, \quad (6)$$

где c_s – оптимальный параметр размытости для непараметрической оценки регрессии, который определяется в процессе оптимизации среднеквадратичного критерия:

$$W(c_s) = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left[x_i - \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{s} x_j K\left(\frac{u_i - u_j}{c_s}\right)}{\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{s} K\left(\frac{u_i - u_j}{c_s}\right)}\right]^2 \to \min_{c_s}. \quad (7)$$

Переход к «равномерной сетке» позволяет дополнительно сгладить непараметрическую оценку условной плотности распределения. Однако при реализации такого подхода возникают трудности, связанные с пропуском данных. Особенно эта проблема будет актуальна в условиях малых выборок, когда разрывы между измерениями могут быть значительными. В местах пропуска данных непараметрическая оценка (6) обратится в неопределенность. В некоторых случаях это может повлечь за собой появление новых «ложных» решений, которые помешают достичь заданной цели в процессе управления.

Для преодоления возникших трудностей предлагается представить непараметрическую модель (6) в виде агрегата из двух величин:

$$\hat{M}(X|u) = \{\hat{x}(u), \Omega(u)\}, \quad (8)$$

где $\hat{x}(u)$ – оценка регрессии; $\Omega(u)$ – логическая переменная, которая принимает значение, равное единице, если в окрестности u имеются наблюдения, и, соответственно, ноль, если выборочных данных в окрестности нет. Впервые этот подход рассмотрен в [7; 8].

Непараметрическая оценка регрессии строится на основе исходной выборки в узлах «равномерной сетки». Следовательно, в этих узлах необходимо проверить наличие пропусков выборочных данных. Для этого введем в рассмотрение следующую индикаторную функцию:

$$\Omega(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} K\left(\frac{u - u_i}{c_s}\right) > 0 \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

Важнейший этап решения поставленной задачи – оптимизация многоэкстремального критерия (1). Предполагается, что в одномерном случае возможно локализовать основные максимумы оценки условной плотности, указав границы интервалов, в которых они находятся, а затем применить на каждом интервале один из методов локальной оптимизации.

Локализовать основные моды оценки условной плотности распределения можно с помощью эвристической итерационной поисковой процедуры. Обозначим через $[a_g, b_g]$ границы интервала входной переменной, в котором содержится хотя бы одна мода условной плотности (3). Введем поисковую добавку Δ, удовлетворяющую следующим условиям: $0 < \Delta < a_g$, $\Delta = 0{,}005 \cdot c_{s_u}$. Поиск осуществляется с левой границы a_g до тех пор, пока $a_g \le b_g$. На первой итерации $(k = 0)$ присвоим $u_k = a_g$. Левая граница a интервала, в котором содержится один из искомых локальных максимумов, определяется следующим образом.

$$\text{Если } ((f(u_k \mid x) = 0 \;\; u \;\; f(u_k + \Delta \mid x) > 0)) \Rightarrow \Rightarrow \; a = u_k; \;\; \text{иначе } u_{k+1} = u_k + \Delta. \quad (10)$$

Поиск правой границы b локального интервала осуществляется с помощью аналогичной итерационной процедуры, начиная с найденной границы a:

$$\text{Если } ((f(u_k \mid x) > 0 \;\; \text{и} \;\; f(u_k + \Delta \mid x) = 0) \text{ или } ((f(u_k - \Delta|x) > f(u_k|x)) \text{ и } (f(u_k + \Delta|x) > f(u_k|x))) \Rightarrow b = u_k; \text{ иначе } u_{k+1} = u_k + \Delta. \quad (11)$$

После локализации всех максимумов оценки условной плотности распределения на каждом соответствующем интервале применяется один из методов одномерной оптимизации. В результате получаем искомое множество $\{u_j\}$ значений входной переменной, доставляющее решение задачи стабилизации.

Было предложено использовать оценку производной условной плотности распределения. Непараметрическая оценка производной от условной плотности распределения вероятности будет иметь следующий вид [4]:

$$\hat{f}'\left(u \mid x = x^*\right) = \frac{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{c_{s_x}} K\left(\frac{x^* - \tilde{x}_i}{c_{s_x}}\right)\frac{1}{c_{s_{du}}} K'\left(\frac{u - \tilde{u}_i}{c_{s_{du}}}\right)}{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\frac{1}{c_{s_x}} K\left(\frac{x^* - \tilde{x}_i}{c_{s_x}}\right)} = \frac{\frac{1}{c_{s_{du}}}\sum_{i=1}^{s} K\left(\frac{x^* - \tilde{x}_i}{c_{s_x}}\right) K'\left(\frac{u - \tilde{u}_i}{c_{s_{du}}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} K\left(\frac{x^* - \tilde{x}_i}{c_{s_x}}\right)}. \quad (12)$$

Если гарантировать унимодальность оценки условной плотности для каждого локального интервала,

тогда для u, принадлежащего этому интервалу, необходимо решить уравнение с единственным корнем:

$$\hat{f}'\left(u \mid x = x^*\right) = 0\,. \qquad (13)$$

Оценка (12) содержит параметр $c_{s_{du}}$. Параметр $c_{s_{du}}$ определяет ширину диапазона, в котором наиболее вероятно содержится решение уравнения (13), при этом значение $c_{s_{du}}$ в широком диапазоне не оказывает существенного влияния на точность получаемого решения.

Для численного решения уравнения (13) выбран метод Эйлера, в котором стандартная процедура метода была модифицирована добавлением дополнительного уточняющего условия. Вычислительная процедура алгоритма решения уравнения с единственным корнем на локальном интервале $[a,b]$ состоит из двух шагов.

На первом шаге вычисляется значение

$$u_{k+1} = u_k + gf'(u_k \mid x = x^*)\,, \qquad (14)$$

где u_k – текущее решение; g – коэффициент, отвечающий за скорость сходимости.

На следующем шаге происходит анализ знака оценки производной:

$$\begin{aligned} &\text{Если } ((f'(u_{k+1} \mid x) > 0 \text{ и } f'(u_k \mid x) < 0) \\ &\text{или } (f'(u_{k+1} \mid x) < 0 \text{ и } f'(u_k \mid x) > 0)) \Rightarrow g = 0{,}5 \cdot g. \end{aligned} \qquad (15)$$

Затем происходит возврат к первому шагу. Условием остановки итерационной процедуры служит достижение заданной точности решения ε. В результате выполнения алгоритма для всех найденных интервалов получаем искомое множество $\{u_j\}$ значений входной переменной.

При реализации такого подхода удается достигнуть большей скорости сходимости алгоритма к решению, чем в случае максимизации критериальной функции (1), что становится возможным за счет внедрения дополнительного коэффициента g.

Описанный выше подход к решению задачи стабилизации нелинейного статического объекта был реализован в виде программной системы на языке C++ Builder 6. В представленной реализации алгоритма рассмотрен объект, у которого связь между входной и выходной переменной задана кубической параболой $x = 0{,}005u^3 - 0{,}015u^2 - 1{,}35u + 10$. Для одномерной оптимизации на локальном интервале был использован метод деления отрезка пополам.

В рабочем окне программы (рис. 3) пользователь может задавать основные параметры алгоритма, закон распределения и дисперсию помехи в канале измерения выходной переменной, а также необходимую точность получаемых результатов.

Алгоритм управления был многократно протестирован при различных параметрах. В качестве показателя надежности Ψ алгоритма было принято соответствие количества найденных решений истинному их количеству. По результатам серии экспериментов подтверждение получил тот факт, что ключевым настраиваемым параметром алгоритма является значение коэффициента c_{s_x}. Критерия для выбора оптимального параметра c_{s_x} не существует, так как постановка задачи предполагает отсутствие вида истинной характеристики объекта управления.

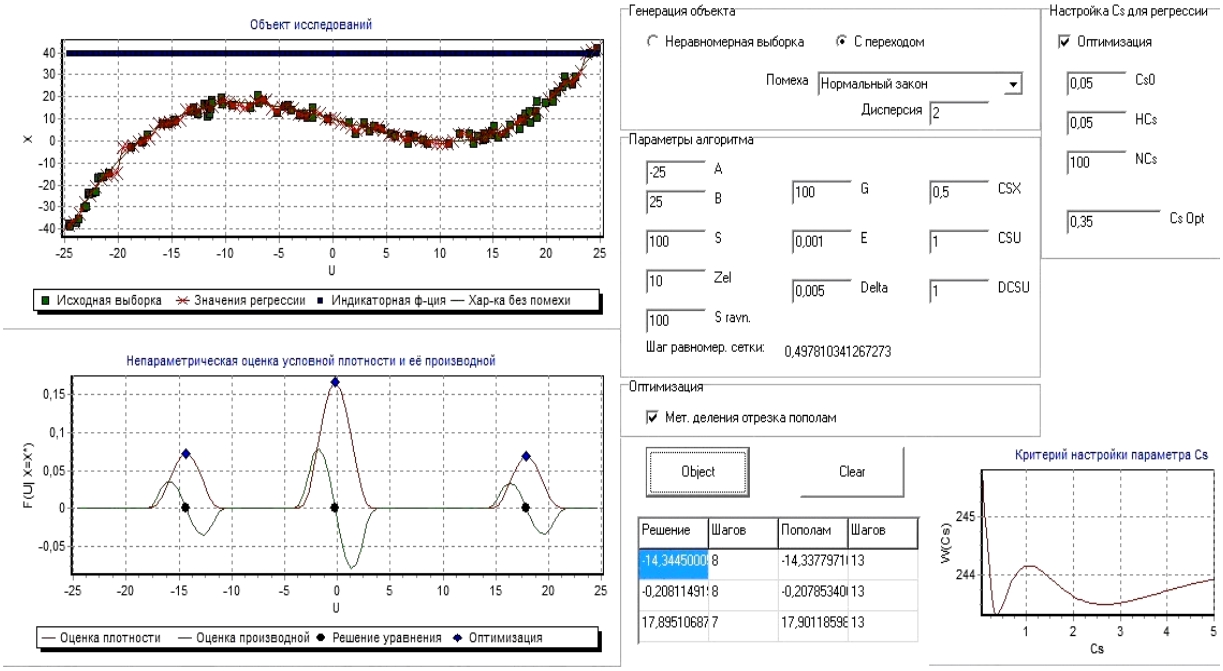


Рис. 3. Рабочее окно программной системы с результатом работы алгоритма

Основное внимание при анализе работоспособности предложенного алгоритма уделялось экспериментам с выборками малых размеров, что является особенно актуальным для использования алгоритма на практике. Вначале алгоритм был протестирован при отсутствии помехи в канале измерения выходной величины. Входное воздействие выбиралось случайным образом на интервале [–25, 25]. Исходная выборка наблюдений за объектом управления была выбрана объемом $s = 100$. После стократного запуска при различных выборках было установлено, что для $c_{s_x} \le 0,25$ надежность работы алгоритма управления Ψ составила $\approx 60\,\%$, а для $0,25 < c_{s_x} \le 5$ – 100 %. Однако стоит отметить, что при достаточно высоком значении параметра c_{s_x} ухудшается точность найденного решения уравнения (13).

Далее алгоритм управления был протестирован при добавлении значительной помехи в канале измерения выходной переменной: $h^x = 20\,\%$. По-прежнему рассматривается случай малой выборки исходных наблюдений за объектом. По результатам многочисленных запусков на различных выборках было установлено, что для $c_{s_x} \le 0,25$ надежность Ψ алгоритма $< 50\,\%$, для $0,25 < c_{s_x} \le 1$ – $\approx 70\,\%$, а если $1 < c_{s_x} < 2$ – $\approx 80\,\%$. При увеличении объема исходной выборки до $s = 200...300$ надежность нахождения решений в случае 20%-й помехи составила 100 %.

Проведенные исследования показывают, что преимущество описанного выше алгоритма для решения задачи управления стохастическим статическим объектом заключается в высокой надежности нахождения решений для неоднозначных характеристик при малых объемах выборки и значительной помехи в канале измерения выходной величины. К недостаткам предложенного подхода относится отсутствие критерия для выбора параметра c_{s_x}, который в большей степени, чем все остальные параметры, отвечает за точность результатов, а также за количество найденных альтернатив при неоднозначности в выборе входного воздействия.

Библиографические ссылки

1. Люблинский Б. С. Адаптивная стабилизация и оптимизация нелинейных статических объектов : дис. … канд. техн. наук. Л., 1983.

2. Рубан А. И. Методы анализа данных : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 2004.

3. Слонова Л. А. Разработка и исследование непараметрических вероятностных моделей стохастических систем : дис. … канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2004.

4. Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание сигналов. М. : Наука. Физматлит, 1997.

5. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятностей и ее применения. 1969. Т. 14. Вып. 1. С. 156–161.

6. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Stat. 1962. Vol. 33. P. 1065–1076.

7. Медведев А. В. Анализ данных в задачах идентификации // Компьютер. анализ и моделирование. Т. 2. Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1995. С. 201–206.

8. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4. С. 4–9.

E. D. Agafonov, Yu. V. Smeshko

NONPARAMETRIC ESTIMATION OF CONVENTIONAL DENSITY IN PROBLEM OF STATICAL OBJECT CONTROL

The problem of nonlinear static object control using stochastic models based on nonparametric estimation of conventional density distribution is considered. Input variables of an object providing a desirable output are found by optimizing of the conventional density estimation. Some approaches to the optimization problem solution and algorithm adjustment are discussed.

Keywords: stochastic model, nonparametric estimation of conditional density of distribution, static object control, optimization problem.

© Агафонов Е. Д., Смешко Ю. В., 2011

УДК 64.06.001; 69.002.5

А. С. Ереско, С. П. Ереско

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИВОДА РЫЧАЖНЫХ ГИДРОМЕХАНИЗМОВ ГРУЗОПОДЪЁМНЫХ МАШИН*

Приведена методика динамического анализа рычажного гидромеханизма привода подъема стрелы и поворота ковша фронтального погрузчика, дан вывод функции нагрузочного режима исполнительного гидроцилиндра гидропривода грузоподъемного механизма фронтального погрузчика и пример динамического анализа универсального рычажного грузоподъемного механизма с использованием CAE-системы APM Winmachine.

Ключевые слова: динамический анализ, гидромеханизм, нагрузочный режим, гидроцилиндр, фронтальный погрузчик, CAE-система.

В различных отраслях машиностроения, таких, например, как подъемно-транспортное и строительно-дорожное машиностроение, а также авиационно-космическая техника широко применяются гидроприводы, содержащие исполнительные гидроцилиндры, приводящие в действие плоские рычажные механизмы, нагруженные весовой нагрузкой. Рычажная связь и вариативность направления движения звеньев исполнительного механизма при выполнении рабочих операций обусловливают изменение весовых и инерционных нагрузок, что на этапе проектирования механизмов затрудняет реализацию имитационного математического моделирования и анализ динамики процесса их эксплуатации.

В работе [1] рассмотрен элементарный рычажный механизм с гидроприводом и приведена методика анализа его динамики, которая может быть принята за основу при проведении анализа динамики более сложных механизмов. Усовершенствованными примерами [2] таких механизмов могут служить разработанные нами гидроприводы грузоподъемного механизма [3] и рабочего оборудования фронтального погрузчика [4] (рис. 1).

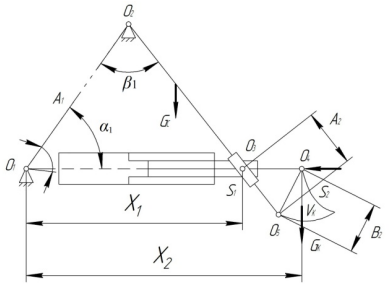


Рис. 1. Кинематическая схема гидропривода рабочего оборудования одноковшового погрузчика

Обозначим постоянные и переменные параметры механизма и привода: A_1 – размер установочной базы пяты гидроцилиндра O_1 и шарнира стрелы O_2; A_2 – размер установочной базы шарнира поворота ковша O_4; X_1, X_2, – координаты перемещений соответствующих секций телескопического гидроцилиндра; α_1, β_1 – переменные углы, определяющие положение механизма. В схеме на рис. 1. совмещены два механизма, образующие соответственно кинематические треугольники O_1,O_2,O_3 и O_3,O_4,O_5, приводимые в движение различными секциями одного исполнительного гидроцилиндра телескопического типа, причем центральная точка O_3 расположена на кулисе и ее положение будет зависеть как от подъема стрелы (при изменении X_1), так и от поворота ковша (при изменении координаты X_2).

Рассмотрим отдельно механизм подъёма стрелы (рис. 2).

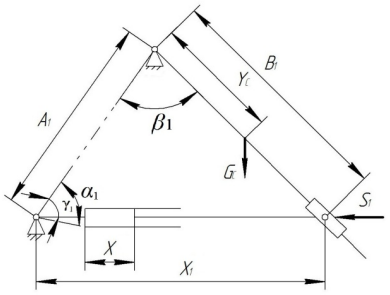


Рис. 2. Кинематическая схема механизма подъема стрелы

Требуется определить функцию нагрузочного режима S_1 в зависимости от перемещения первой секции гидроцилиндра X_1 и массы стрелы G_c без учета масс отдельных элементов гидроцилиндра, так как они совместно с переменной массой рабочей жидкости, находящейся внутри полостей гидроцилиндра, уже учтены в имитационной модели гидроцилиндра [5].

Составляя уравнение моментов относительно опоры O_2 и приравнивая его нулю (состояние равновесия механизма), получим:

$$S_1(x_1)\cdot\sin\left[\beta_1(x_1)-\alpha_1\right]\cdot B_1 - \\ - G_c\cdot\cos\left\{90^\circ-\left[\alpha_1(x_1)+\gamma_1\right]\right\}\cdot r_c = 0, \quad (1)$$

откуда для текущего положения механизма

$$S_1(x_1)=\frac{G_c\cdot\cos\left\{90^\circ-\left[\alpha_1(x_1)+\gamma_1\right]\right\}\cdot r_c}{\sin\left[\beta_1(x_1)-\alpha_1\right]\cdot B_1}; \quad (2)$$

*Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (МК-663.2010.8).

Как видно из формулы (2), функция нагрузки зависит от положения механизма, задаваемого координатой X_1 и для выявления зависимости $S_1 = f(x_1)$ требуется определить функции $\alpha_1 = f(x_1)$ и $\beta_1 = f(x_1)$. В первом приближении данные функции можно найти на этапе проектирования механизма следующим образом. Задавая дискретно массив координат X_{1i} и построив несколько положений по траекториям движения точек механизма, определяем значения α_{1i} и β_{1i} и аппроксимируем их математическими зависимостями, соответствующими полям парных корреляций для искомых функций.

Для нахождения более точного и универсального решения переходим к относительным параметрам, принимая в качестве линейной единицы измерения постоянный размер базы механизма $A_1 = 1$.

Вводя относительные переменные $\overline{B}_1 = \frac{B_1}{A_1}$; $\overline{X}_1 = \frac{X_1}{A_1}$ и выбирая в качестве обобщенной координаты X_1, что равносильно перемещению поршня первой секции гидроцилиндра, так как $X_1 - X = \text{const}$, а, следовательно, и $\dot{X}_1 = \dot{X}$, опишем кинематику плоского рычажного механизма, используя передаточные отношения его звеньев 1, 2, 3:

$$i_{1,2}(X_1) = \frac{\dot{\alpha}_1}{\dot{X}_1} = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{d\alpha_1}{d\overline{X}_1};$$
$$i_{3,2}(X_1) = \frac{\dot{\beta}_1}{\dot{X}_1} = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{d\beta_1}{d\overline{X}_1}. \quad (3)$$

С учетом решений, приведенных в [1] для передаточных функций, имеем

$$i_{12}(x_1) = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{1 - B_1^2 - \overline{x}_1^2}{\overline{x}_1^2 \cdot \sqrt{\left[\overline{x}_1^2 - \left(1 - \overline{B}_1^2\right)\right] \cdot \left[\left(1 + \overline{B}_1^2\right) - \overline{x}_1^2\right]}};$$
$$i_{32}(x_1) = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{2 \cdot \overline{x}_1}{\sqrt{\left[\overline{x}_1^2 - \left(1 - \overline{B}_1^2\right)\right] \cdot \left[\left(1 + \overline{B}_1^2\right) - \overline{x}_1^2\right]}}. \quad (4)$$

Искомые функции кинематического положения механизма будут определены в результате интегрирования приведенных ниже зависимостей:

$$\alpha_{1(x_1)} = \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \frac{1 - \overline{B}_1^2 - \overline{x}_1^2}{\overline{x}_1^2 \cdot \sqrt{\left[\overline{x}_1^2 - \left(1 - \overline{B}_1^2\right)\right] \cdot \left[\left(1 + \overline{B}_1^2\right) - \overline{x}_1^2\right]}} dx; \quad (5)$$

$$\beta_{1(x_1)} = 2 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \frac{\overline{x}_1}{\overline{x}_1^2 \cdot \sqrt{\left[\overline{x}_1^2 - \left(1 - \overline{B}_1^2\right)\right] \cdot \left[\left(1 + \overline{B}_1^2\right) - \overline{x}_1^2\right]}} dx. \quad (6)$$

Для определения нагружающего усилия S_2 рассуждения аналогичны.

Аналогичным способом, проводя разбиение механизмов на элементарные звенья, можно произвести анализ и синтез плоских рычажных механизмов любой сложности. Вычисление значений определенных интегралов (5) и (6) производится с помощью стандартной подпрограммы QART из пакета SSP прикладных программ на фортране [6].

Для применения выведенных уравнений нагрузочного режима в анализе изменения давлений в гидроприводе исполнительного гидроцилиндра используются исследования, приведенные в работе [7].

Результаты синтеза и динамического анализа, рассмотренного выше плоского рычажного механизма в CAE-системе АПМ Winmachine [8] (модуль Dynamics), приведены на рис. 3–7

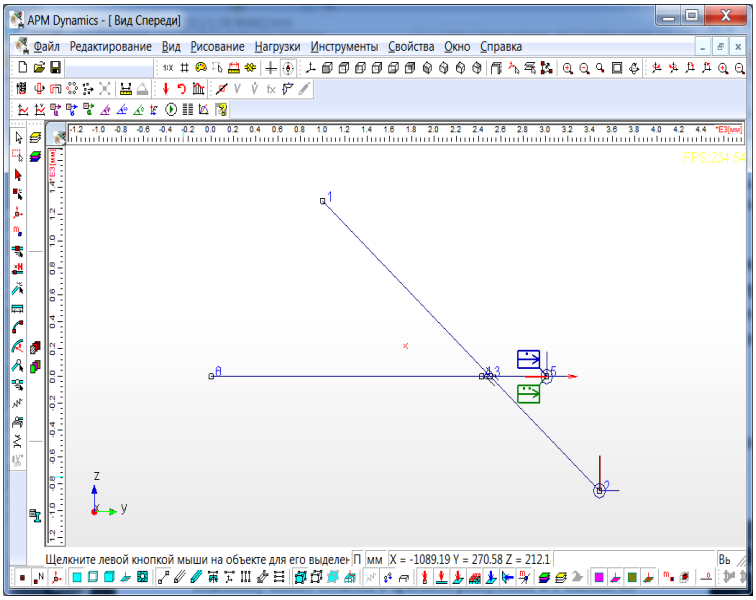


Рис. 3. Расчетная модель рабочего оборудования фронтального погрузчика

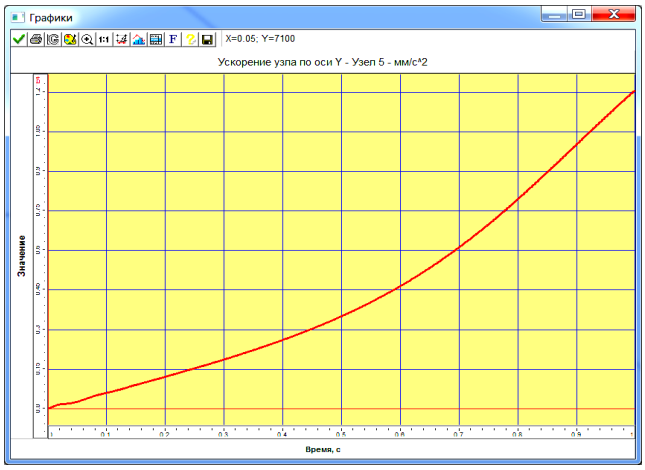


Рис. 4. Диаграмма ускорений верхнего шарнира крепления ковша

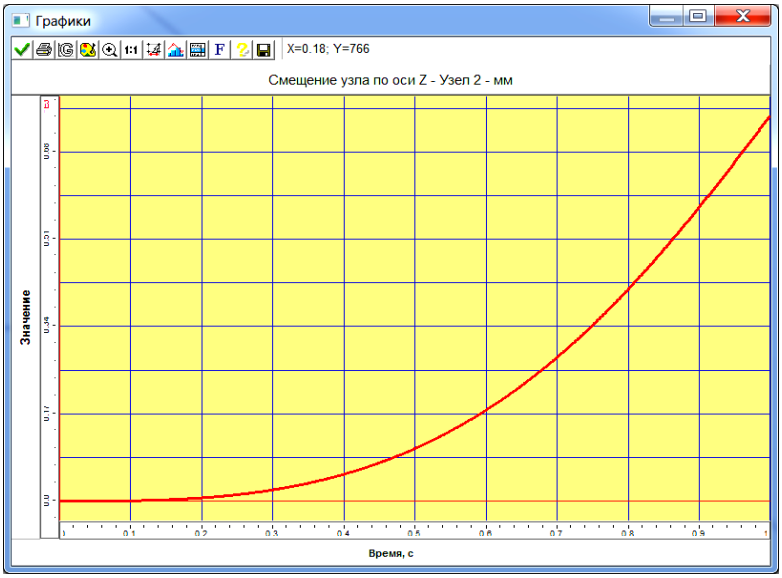


Рис. 5. Диаграмма перемещений нижнего шарнира крепления ковша

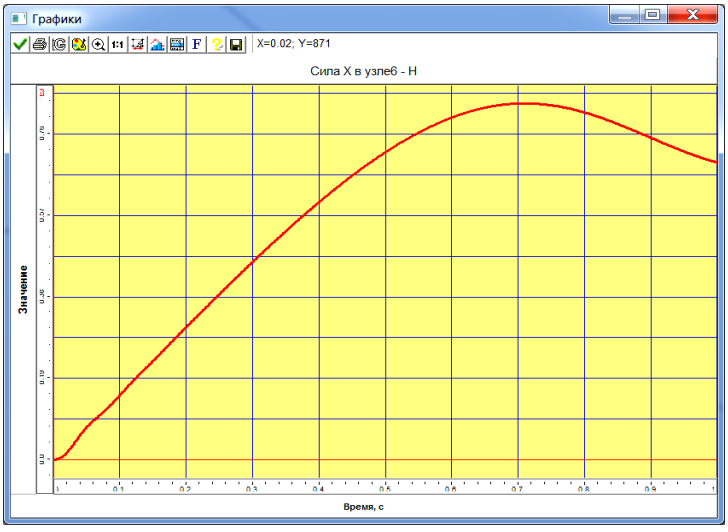


Рис. 6. График изменения силы на штоке гидроцилиндра при повороте ковша погрузчика

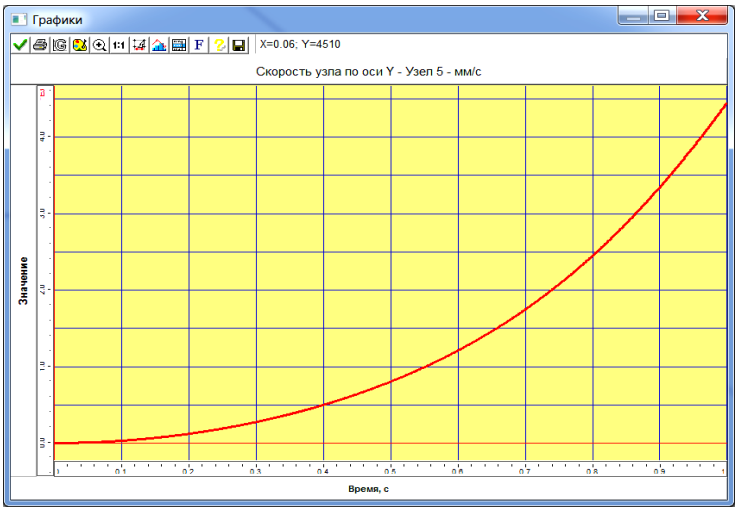


Рис. 7. Диаграмма изменения скорости подъема стрелы

Приведенная методика определения функций нагрузочного режима гидропривода грузоподъемных механизмов, использующая их относительные размеры и передаточные функции, позволяет находить переменные по рабочему ходу исполнительных гидроагрегатов функции весовых и инерционных нагрузок, действующие от элементов грузоподъемных механизмов различных типов и приводить их к элементам крепления исполнительных гидроагрегатов, что позволяет применять универсальную имитационную модель и программное обеспечение [9] без их дополнительного редактирования и последующей трансляции.

Использование пакета программ АРМ Winmachine кроме анализа динамических характеристик дает возможность анализировать работоспособность синтезируемых механизмов, что в совокупности с описанной методикой в итоге позволяет сократить сроки проектирования и повысить качество принимаемых проектных решений.

Библиографические ссылки

1. Прокофьев В. Н., Борисов Б. П. Динамика гидропривода при рычажной связи гидродвигателя с объектом управления // Изв. вузов. Машиностроение. 1977. Т. 5. С. 84–88.

2. Ереско А. С. Разработка эффективных грузоподъёмных механизмов мобильных подъёмно-транспортных машин // Вестник НИИСУВПТ : сб. науч. тр. под ред. Н. В. Василенко. Красноярск, 2003. Вып. 14. С. 70–76.

3. Пат. РФ № 2173270 от 10.09. 2001. Грузоподъемный механизм / Ереско А. С., Ереско С. П. Бюл. № 25.

4. Пат. РФ № 2195276 от 25.10.2002. Фронтальный погрузчик / А. С. Ереско, С. П. Ереско и др. Бюл. № 26.

5. Ереско А. С. Имитационная математическая модель усовершенствованного гидропривода грузоподъёмных механизмов // Вестник НИИ СУВПТ : сб. науч. тр. под ред. Н. В. Василенко. Красноярск, 2003. Вып. 14. С. 257–261.

6. Сборник научных программ на фортране. М. : Статистика, 1974.

7. Ереско С. П. Анализ нагрузочного режима гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов // Транспортные средства Сибири (Состояние и проблемы) : материалы межвуз. науч.-практ. конф. Красноярск, 1994. С. 193–198.

8. Система расчета и проектирования механических конструкций и оборудования в области машиностроения и строительства (Система АРМ WinMachine) : программы для ЭВМ : свидетельство об офиц. регистрации № 990578(РФ) / В. В. Шелофаст, Е. Г. Стайнова, В. В. Шелофаст и др. Заявл. 08.06.1999. Зарегистр. РОСПАТЕНТ. 04.08.1999.

9. Имитационная модель гидроцилиндра (GYDROZ) : программы для ЭВМ : свидетельство об офиц. регистрации № 2004611074 / С. П. Ереско, А. С. Ереско, С. И. Васильев и др. Зарегистр. РОСПАТЕНТ. 29.04.2004.

A. S. Eresko, S. P. Eresko

DYNAMIC ANALYSIS OF LEVERAGE DRIVE OF HYDRAULIC MECHANISMS OF LIFTING MACHINES

Procedure of dynamic analysis of leverage hydraulic mechanism drive of lifting jib and turning bucket of frontal loader is presented, the derivation of load regime function of loader and dynamic analysis of universal leverage lifting mechanism with use of CAE-system of APM Winmachine example is given.

Keywords: dynamic analysis, hydraulic mechanism, load regime, hydrauliccylinder, frontal loader, CAE-system.

© Ереско А. С., Ереско С. П., 2011

УДК 519.711.3: 004.8.023

С. Г. Заблоцкий, Е. С. Семенкин, А. В. Швец

КОЭВОЛЮЦИОННЫЙ АСИМПТОТИЧЕСКИЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО СЛОГОВОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СЛИТНОЙ РЕЧИ*

Последний этап работы системы автоматического распознавания слитной речи, основанной на слоговой модели, состоит в преобразовании полученной цепочки слогов в последовательность слов, образующих предложение. В данной работе предложен и исследован метод, основанный на специальном стохастическом алгоритме оптимизации, позволяющий определять за приемлемое время наиболее правдоподобное предложение, соответствующее входящему звуковому сигналу.

Ключевые слова: коэволюционный алгоритм, слоговая модель, распознавание речи, динамическое программирование.

Задача распознавания слитной речи состоит в том, чтобы составить наиболее правдоподобную последовательность слов, соответствующую полученному акустическому сигналу. Существуют системы обработки слитной английской речи, однако некоторые особенности русского языка не позволяют напрямую использовать разработанные системы. Русский язык обладает большим количеством различных словоформ, в связи с этим традиционные пословные модели языка, основанные на N-граммах (последовательностей, состоящих из n элементов) для слов, оказываются неприменимыми [1]. Размер используемого словаря многократно увеличивается, в то время как качество и скорость обработки информации существенно снижается.

Разработанные слоговые модели позволяют сократить размер словаря основных единиц распознавания на несколько порядков. Так, словарь, состоящий из 1,5 миллиона слов, может быть преобразован в словарь, содержащий около 12 тысяч слогов. Благодаря этому становится возможным разработать систему, позволяющую вести распознавание с высокой точностью и скоростью.

Распознавание проходит в несколько этапов, в течение которых используются акустические и лингвистические модели языка и применяются скрытые марковские модели, дискретное преобразование Фурье, построение частотных кепстральных коэффициентов, извлечение фонем языка [2]. Получаемые в процессе распознавания фонемы преобразуются в большие по размеру единицы распознавания на основе материала, который был получен при предварительной тренировке системы на текстовых корпусах. Таким образом, для слоговой модели речь преобразуется в слоги, при этом не отмечаются места, в которых должны проходить границы слов.

Полученная цепочка слогов должна быть преобразована в последовательность слов. Данный этап является одним из наиболее важных. Входящая цепочка может иметь более шести десятков слогов, при этом часть из них может содержать ошибки, возникшие при распознавании акустического сигнала. Согласно [3] считается, что на данный момент не существует правил и методов определения границ слов при использовании такой модели. Рассмотрение всех комбинаций слов за приемлемое время является невозможным и требует высоких вычислительных мощностей.

В данной работе предложен и исследован метод, позволяющий за приемлемое время определить границы слов, восстановить последовательность произнесенных слов и повысить качество распознавания. В том числе разработан коэволюционный асимптотический генетический алгоритм решения задач безусловной оптимизации, позволяющий определять наиболее правдоподобное предложение.

Метод оценки правдоподобия предложения по слоговой модели. Чтобы определить, какое из нескольких произвольно составленных из слогов предложений больше удовлетворяет искомой последовательности слов, предложен способ получения оценки правдоподобия предложения. Одним из инструментов, необходимых для получения оценки, является большой словарь всех словоформ русского языка. Так, выбран грамматический словарь Зализняка [4], содержащий около 1,7 миллиона слов. Стоит отметить, что передовые системы распознавания речи для английского языка используют словарь порядка 100 тысяч слов. Слоги, получаемые в результате преобразования речи, не соответствуют по написанию слогам, составляющим произнесенное слово. Например, слово «молоко» при отсутствии ошибок будет распознано как {ма, ла, ко}, так как безударная гласная «о» произносится как фонема «а». В связи с этим слова используемого словаря приведены к такому виду, как произносятся. Преобразование выбранного словаря к указанному виду осуществляется на основании правил произношения слов русского языка [5]. Для удобства описания далее в примерах используется правильное написание слов.

Для более точного определения состава предложения применяется статистика встречаемости фраз. Каждое слово русского языка имеет большое разнообразие словоформ; так, многие словосочетания отличаются друг от друга только формами входящих в них слов.

*Данные исследования проводятся при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» 2011-1.9-519-005.

Например, словосочетания «построил большой дом» и «построивший большой дом» отличаются только формой первого слова, начальные же формы всех слов совпадают. Объединение всех словоформ слова в один класс позволяет увеличить частоты отдельных N-грамм до приемлемого уровня, кроме того, это дает возможность использовать статистику при ошибочно распознанных окончаниях слов [6]. В качестве основных используемых N-грамм выбраны триграммы, так как по сравнению с двуграммами они содержат больше информации и в отличие от N-грамм более высокого порядка имеют большую частоту встречаемости. Целесообразно, чтобы оценка правдоподобия была тем выше, чем больше находится в предложении триграмм из базы N-грамм и чем выше их частота.

Необходимо, чтобы составленные слова являлись словами из словаря, именно в этом случае можно будет определить начальные формы слов и проверить наличие тройки слов в базе N-грамм. Присутствие же малейших ошибок распознавания приведет к тому, что некоторые слова будут отмечены как неизвестные, и предложение получит низкую оценку. Предложенный алгоритм способен обрабатывать ошибки распознавания. Существует три типа ошибок: удаление слогов, замена одних на другие или добавление лишних. Очевидно, что перебрать для данного предложения все варианты возможных операций замен, удалений и вставок невозможно за приемлемое время при большом числе слогов, даже если вводить условное ограничение на допустимое число операций. При выполнении алгоритма определяется, каким словам из словаря могут соответствовать составленные комбинации слогов. Один набор слогов может соответствовать нескольким словам, причем в большей или меньшей степени. Например, слово «бан» одинаково похоже на слова «банк» и «бант», но меньше похоже на слова «банан» и «бинт». Таким образом, для каждого слова предложения требуется получить список похожих слов и соответствующих им чисел, которые показывали бы, насколько рассматриваемое слово отвечает найденному слову из словаря. Для удобства далее будем называть такие числа коэффициентами подобия.

Для того чтобы узнать, насколько близким является одно слово по отношению к другому, возьмем за основу расстояние Левенштейна. Расстоянием Левенштейна (также редакционное расстояние) между двумя строками в теории информации и компьютерной лингвистике называют минимальное количество операций вставки одного символа, удаления одного символа и замены одного символа на другой, необходимых для преобразования одной строки в другую. Задачу поиска расстояния между словами эффективно решает алгоритм Вагнера–Фишера [7] с помощью метода динамического программирования.

Чтобы учесть схожесть слов по звучанию при вычислении расстояния, алгоритм Вагнера–Фишера был модифицирован введением различных нецелочисленных весов для удаления, вставки или замены элемента, зависящих от фонетических особенностей элементов. Во-первых, присваиваются немного большие веса операциям с первыми буквами слова, так как первую часть слова диктор обычно произносит более четко, чем последнюю. Таким образом, считаем, что изменение первых букв меняет слово сильнее, нежели изменение последних букв. Во-вторых, больший вес имеют операции с гласными, так как они длиннее по звучанию, более устойчивы к изменению и поэтому легче поддаются распознаванию, чем согласные. Но замена некоторых гласных другими, такая как «о – а», «е – и», будет иметь несколько меньший вес, поскольку эти гласные часто близки по произношению в русском языке. В-третьих, небольшой вес будут иметь операции над согласными, причем немного меньший – операции замены согласных некоторых пар, таких как «ж – ш», «б – п», и еще меньший – операции добавления и удаления сдвоенных согласных.

Посчитав таким способом расстояние d между словами, алгоритм может вычислить коэффициент подобия K между словами p_1 и p_2, по следующей формуле:

$$K(p_1, p_2) = \begin{cases} 1 - d \cdot N_1(n), & d \le N_2(n), \\ 0, & d > N_2(n), \end{cases}$$

где n – длина рассматриваемого слова p_1; N_1 и N_2 – некоторые переменные, зависящие от длины слова и сочетающиеся так, что $0 \le K(p_1, p_2) \le 1$. Таким образом, при расстоянии $d = 0$, т. е. при совпадении слов коэффициент подобия равен 1, при значительном расстоянии равен 0. Зависимость от n появляется из тех соображений, что изменения в слове небольшой длины выражены сильнее, чем такие же изменения в более длинном слове. Так, слово «ус» меньше похоже на «уж», чем слово с ошибкой «предлосенный» на слово «предложенный».

Возвращаясь к задаче построения списка похожих слов, следует отметить, что из всех слов словаря в этот список включаются только те, которые удовлетворяют некоторому введенному ограничению на допустимый суммарный вес операций изменения слова W. Так, нет необходимости находить расстояния со всеми словами словаря. Как только словарное слово или его начальная часть отличается от рассматриваемого слова более чем на W, то его и все слова из словаря, имеющие схожую начальную часть, следует убрать из рассмотрения.

Ускорить процесс поиска позволяет хранение словаря в форме дерева, в английской литературе называемого trie, происходящего от части слова «retrieval», что означает поиск, извлечение [8]. Структура trie представляет собой граф, узлами которого являются части слов (в данной работе – фонемы). Вершиной дерева является пустой узел, который представляет собой начало всех слов из словаря. Конечными узлами (листьями) являются окончания слов. Основное преимущество этой структуры – возможность эффективного поиска всех слов, имеющих общее начало. Такая структура применяется в различных областях, например, может быть использована как вспомога-

тельный инструмент в системах автоматической коррекции слов в тексте [9].

При таком подходе, при нарушении ограничения на W, алгоритм перестанет идти вглубь дерева, перейдя на соседнюю ветвь или поднявшись на уровень вверх, тем самым отбросив определенное число слов из рассмотрения. Как только достигается конец слова за допустимое число операций, вычисляется коэффициент подобия, который вместе с найденным словом добавляется в список подобных слов для сравниваемого со словарем слова.

Полученный для каждого слова составленного предложения список похожих слов следует преобразовать в список, состоящий из начальных форм, соответствующих данным словам. При этом размер списка может немного увеличиться, так как одно слово может иметь несколько начальных форм. Таким, например, является слово «гладь», которое имеет две начальные формы: «гладь» и «гладить».

Для того чтобы найти наиболее правдоподобное предложение, следует выбрать по одному слову из каждого списка так, чтобы полученная последовательность слов доставляла максимум произведению триграмм. При этом учитываются коэффициенты подобия слов, т. е. добавляется некоторый штраф за изменение исходной последовательности слогов. Таким образом, оценка правдоподобия (Q) для отдельного предложения определяется по следующей формуле:

$$Q = \prod_{i=1}^{N-2} \left(q_i \cdot \prod_{j=1}^{3} p_i^j \right) \cdot \frac{\sum_{h=1}^{N} p_h}{N},$$

где q_i – частота i-й триграммы; p_i^j – коэффициенты подобия входящих в триграмму слов; N – количество слов; S – количество слогов; p_h – коэффициент подобия слова под номером h. Множитель под внешним знаком произведения заменяется на 1, если соответствующая триграмма отсутствует или произведение коэффициентов подобия меньше некоторого заданного ограничения.

Такой способ вычисления позволяет выявлять предложения с хорошей статистикой, но имеющие неизвестные слова. Таким образом, если диктор произнесет слово, не входящее в состав словаря, алгоритм представит его в виде набора существующих слов, либо укажет, что данное слово является неизвестным при том условии, что остальные слова дают предложению максимальную оценку.

Для сокращения времени поиска воспользуемся в очередной раз методом динамического программирования. На первом этапе для каждой пары, состоящей из двух предпоследних слов, выбирается слово из последнего списка так, чтобы значение оценки правдоподобия было как можно больше. После получения значения для каждой пары предпоследних слов происходит переход к рассмотрению следующей пары, находящейся ближе к началу предложения. Аналогичным образом происходит выбор третьего слова, но теперь уже учитываются накопленные значения от предыдущих пар, которые следует перемножить с вычисленным для данной тройки значением. Продолжив рекуррентный процесс, по достижении начала предложения получим требуемую оценку. Пример отыскания предложения с неполными списками для слов изображен на рисунке (в рамках – слова с начальными формами).

Итак, полный алгоритм получения оценки правдоподобия составленного предложения описывается следующим образом.

1. Для каждого слова, входящего в предложение, проверить, был ли ранее составлен список подобных слов с коэффициентами подобия. Если такого списка нет:

– если слово находится в словаре, то добавить его в список без изменений с коэффициентом подобия 1;

– с помощью алгоритма Вагнера–Фишера, адаптированного к данной задаче, найти в словаре, представленном в виде trie, все слова, расположенные в пределах заданного расстояния.

2. С помощью метода динамического программирования выбрать те слова из списков, которые образуют предложение с наибольшей оценкой Q. Оценка полученного предложения является искомой оценкой.

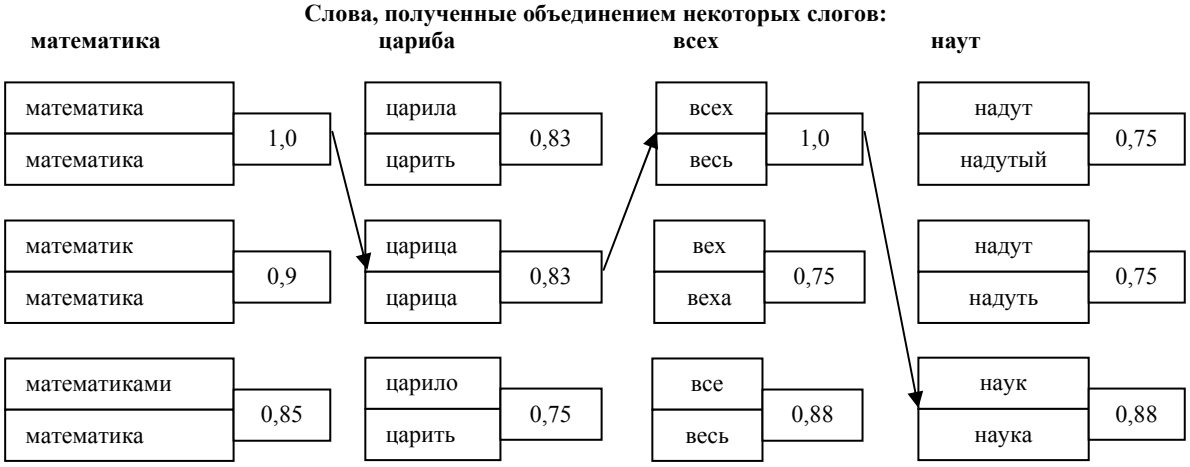


Иллюстрация процесса поиска наиболее вероятного предложения

Как говорилось выше, рассмотрение всех комбинаций слов для входящей цепочки слогов за приемлемое время является невозможным, поэтому предложен стохастический алгоритм оптимизации, который основывается на идеях генетических алгоритмов (ГА).

Коэволюционный асимптотический генетический алгоритм. Одной из основных проблем при применении генетических алгоритмов является настройка его параметров, от которой существенно зависит эффективность работы. Стандартный ГА имеет как минимум три метода селекции (пропорциональная, турнирная и ранговая), три метода рекомбинации (одноточечная, двухточечная и равномерная) и несколько уровней мутации, требующих дополнительной настройки. Количество возможных комбинаций достигает многих десятков. Полный перебор комбинаций настроек требует чрезмерно много времени и вычислительных ресурсов и не может быть применен на практике. Выбор настроек наугад также является плохой идеей, так как эффективность ГА на одной и той же задаче может варьироваться от нуля до 100 % в зависимости от выбора параметров.

Существует несколько подходов к решению этой проблемы. Например, прямое кодирование параметров ГА нижнего уровня, решающего задачу оптимизации, в хромосому мета-ГА более высокого уровня, решающего задачу настройки параметров [10]. Другой подход состоит в гибридизации ГА со специальным алгоритмом локального поиска в бинарном пространстве [11]. В некоторых приложениях это приводит к низкой чувствительности эффективности ГА к выбору параметров [12; 13], что позволяет избежать их настройки. Существуют и другие подходы.

Так, в [14] была предложена адаптация стратегии ГА за счет конкурирующих подпопуляций. Каждая подпопуляция имеет собственную стратегию (комбинацию параметров алгоритмов). Перераспределение ресурсов обеспечивает доминирование подпопуляции с наиболее подходящей для решаемой задачи стратегией поиска. Этот подход, а также предложенный [15; 16], может рассматриваться как один из примеров коэволюционных генетических алгоритмов, отличающихся идеями организации взаимодействия стандартных генетических алгоритмов.

В [17] рассматривается несколько иной подход, использующий как конкуренцию, так и сотрудничество индивидуальных ГА, имеющих каждый свою комбинацию параметров. Сотрудничество индивидуальных ГА достигается за счет миграции лучших решений во все подпопуляции, что обеспечивает рост эффективности коэволюционного алгоритма за счет положительного эффекта взаимодействия подпопуляций. Проблемой применения коэволюционных алгоритмов является неопределенность выбора кандидатов для включения в коэволюцию. Число таких кандидатов не может превышать полтора-два десятка алгоритмов, в то время как выбирать их надо из сотен.

Еще одним полезным подходом к решению проблемы выбора эффективных настроек ГА является сокращение количества настраиваемых параметров. В [18] был предложен так называемый вероятностный ГА, в котором операция скрещивания была заменена на генерирование потомков в соответствии с распределением вероятностей их компонент. Распределение вероятностей изменялось таким образом, чтобы возрастала вероятность правильного значения гена на конкретном месте в хромосоме. Очевидно, что выбор типа рекомбинации в таком алгоритме не требуется, что сокращает количество возможных комбинаций параметров в три раза.

Еще меньше настраиваемых параметров содержит асимптотический вероятностный генетический алгоритм [19], в котором применяется адаптивная мутация, не требующая предварительной настройки. Дополнительным преимуществом асимптотического алгоритма является способ выполнения генетических операторов, который сводится к изменению распределения вероятностей компонент, что значительно сокращает время на проработку алгоритма. Фактически асимптотический вероятностный ГА имеет всего несколько комбинаций настроек параметров.

В данной работе применен разработанный авторами коэволюционный подход к организации работы асимптотического вероятностного ГА (КАГА), благодаря которому проблема выбора типов применяемых генетических операторов отсутствует.

Данный алгоритм сначала был протестирован на стандартном наборе тестовых функций безусловной оптимизации (например, функций Растригина, Розенброка, Катковника, Дейонга, Экли и др.). Результаты тестирования были сравнены с результатами работы индивидуальных стандартных генетических алгоритмов при равных вычислительных ресурсах (произведение количества индивидов в популяции на число поколений). Усреднение проводилось по 100 запускам каждого алгоритма.

Исследования показали, что на большинстве задач предложенный подход по надежности не уступает наилучшему индивидуальному стандартному ГА (табл. 1) и превосходит его по скорости выполнения. Здесь под надежностью понимается отношение числа запусков, в которых с заданной точностью найден известный оптимум, к общему числу запусков. Скорость – средний номер поколения, на котором впервые в прогоне найден оптимум.

Таким образом, коэволюционный асимптотический генетический алгоритм показывает высокую надежность и эффективность на большинстве тестовых задач и не уступает стандартному генетическому алгоритму. Главное его преимущество заключается в автоматической настройке практически всех параметров, что значительно освобождает работу алгоритма от человеческого фактора и повышает эффективность поиска решения.

Применение асимптотического генетического алгоритма в системе распознавания речи. Для задачи распознавания речи индивид представляет собой бинарную строку, размер которой зависит от количества слогов предложения. Индивид содержит информацию о том, какие слоги следует объединить и где находятся границы слов; так, каждая единица или ноль, стоящие на i-м месте, будут означать, что слоги s_i и s_{I+1} необходимо объединить или отдать разным словам соответственно. Таким образом, длина индивида на единицу меньше количества слогов.

Алгоритм был освобожден от повторного выполнения операций для одинаковых входных данных. Например, был создан ассоциативный массив, ключом которого является предложение, а значением его оценка. Аналогичный массив был создан для триграмм, встречавшихся в предложении, что дало значительный выигрыш по времени, поскольку поиск триграмм по большой базе производится довольно долго, а схожие триграммы присутствуют во многих предложениях, составляемых генетическим алгоритмом.

Эффективность алгоритма была проверена на тестовом наборе предложений. Предварительно ряды распознанных слогов были поделены на 2 класса: полученные в результате распознавания подготовленной, четкой речи, не содержащие ошибок, и речи спонтанной, содержащие до 15 % ошибок. Каждый класс, в свою очередь, разделен на три группы, различающиеся длиной входящих в них цепочек. Усреднение проводилось для каждой из групп, содержащих по 20 различных цепочек слогов.

Результаты данного исследования показали, что для подготовленной речи алгоритм представляет входящую последовательность слогов в виде предложения с незначительным содержанием ошибочных слов (табл. 2). При этом КАГА работает устойчиво, о чем можно судить по среднеквадратичному отклонению от среднего номера поколения, на котором алгоритм находит решение. Для спонтанной речи получаемые предложения также содержат в среднем незначительное количество ошибок относительно изначальной погрешности в ряде слогов (табл. 3). Однако часто в отдельных составленных предложениях погрешность уменьшается или ошибочные слова вовсе отсутствуют, т. е. алгоритм способен повышать качество распознавания.

Таблица 1

Результаты тестирования. Сравнение КАГА с индивидуальными алгоритмами

Функция	Надежность лучшего (на данной функции) индивидуального ГА	Скорость ГА	Надежность КАГА	Скорость КАГА
AdditivePotential	1	2 160	1	1 062
DeJong2	1	3 040	1	2 226
GaussianQuartic	1	2 990	1	1 861
Griewank	0,98	1 428	0,6	3 813
Ackley	1	2 745	1	2 014
Ackley2	1	2 775	1	1 850
Griewank2	1	2 130	1	2 146
Himmelblau	0,72	6 764	0,4	2 237
HyperEllipsoid	1	2 595	1	2 180
HyperEllipsoid2	1	3 875	1	2 073
Rastrigin	1	3 490	1	3 881
Katkovnik	1	3 310	1	2 278
Multiextremal3»	1	3 415	1	1 747
Multiextremal4	1	4 330	1	1 838
MultiplicativePotential»	1	1 845	1	1 335
Rastrigin2	1	2 415	1	1 964
Rastrigin3	1	3 425	0,98	4 259
RastriginWithTurning	1	2 970	1	1 948
Rosenbrock	0,36	6 666	0,44	6 502
SphereModel	1	2 880	1	1 861
Средние значения	0,953	3 262	0,921	2 454

Таблица 2

Результаты тестирования. Предложения подготовленной речи

Входящие цепочки содержат 0 % ошибок					
Длина предложения	Ошибка распознавания, %	Время поиска, с	Количество поколений	Среднеквадратичное отклонение поколений	Количество рассмотренных индивидов
9…20	7	3	2,4	0,5	860
21…50	4	8	5,3	2,9	3 058
51…80	5	41	7,5	3	11 307

Таблица 3

Результаты тестирования. Предложения спонтанной речи

Входящие цепочки содержат 8...15 % ошибок					
Длина предложения	Ошибка распознавания, %	Время поиска, с	Количество поколений	Среднеквадратичное отклонение поколений	Количество рассмотренных индивидов
9…20	20	6	2,6	0,7	1 044
21…50	11	11	7,5	4,9	4 121
51…80	9	47	11	5,2	11 740

Для предложений небольшой длины правильность найденных решений была проверена с помощью алгоритма полного перебора. В отличие от полного перебора предложенный алгоритм находит решение, рассматривая значительно меньшее количество комбинаций слогов, выигрывая таким образом по времени выполнения.

Также проверена способность алгоритма искать решение для предложения, изначально содержащего неизвестные слова, не входящие в состав словаря. В одних случаях алгоритм выделяет неизвестные слова, в других – представляет их в виде ряда более коротких слов, что также является приемлемым результатом для таких предложений.

Таким образом, предложен алгоритм, выполняющий задачи последнего этапа в системах распознавания речи для модели слогового представления слов русского языка. Кроме того, разработан коэволюционный асимптотический генетический алгоритм решения сложных задач безусловной оптимизации, применяемый к решению поставленной задачи. Сейчас разработанная система может быть применена для преобразования в текст речи, произнесенной на заседаниях, конференциях, для документирования архивных звуковых записей, т. е. в областях, не требующих чрезвычайно быстрого отклика системы. В дальнейшем планируется модернизировать алгоритмы, внести дополнительные преобразования, чтобы оптимизировать приложение по времени выполнения. Работая в режиме реального времени, система могла бы принести пользу в самых различных сферах деятельности, в том числе могла бы оказать помощь людям с ограниченными возможностями.

Библиографические ссылки

1. Unlimited vocabulary speech recognition based on morphs discovered in an unsupervised manner / V. Siivola, T. Hirsimäki, M. Creutz, M. Kurimo // Proc. of the 8th European Conf. on Speech Communication and Technology (Eurospeech). Geneva, Switzerland, 2003. P. 2293–2296.

2. Rabiner L., Juang B.-H. Fundamentals of Speech Recognition. M. : Prentice Hall, 1993.

3. Карпов А. А. Модели и программная реализация распознавания русской речи на основе морфемного анализа : дис. … канд. техн. наук. СПб., 2007.

4. Зализняк А. А. Грамматический словарь русского языка: словоизменение. 4-е изд., испр. и доп. М. : Рус. слов., 2003.

5. Кипяткова И. С., Карпов А. А. Модуль фонематического транскрибирования для системы распознавания разговорной русской речи // Искусств. интеллект. 2008. № 4. P. 747–757.

6. Холоденко А. Б. О построении статистических языковых моделей для систем распознавания русской речи // Интеллектуал. системы. 2001. Т. 6. Вып. 1–4. С. 381–394.

7. Wagner R. A., Fischer M. J. The string-to-string correction problem // J. ACM. 1974. Vol. 21. № 1. P. 168–173.

8. Knuth D. E. The art of computer programming. Vol. 3. Sorting and Searching. Reading, Mass. : Addison–Wesley, 1973.

9. Kukich K. Techniques for automatically correcting words in text // ACM Computing Surveys. 1992. Vol. 24. № 4. P. 377–439.

10. Eiben A., Hinterding R., Michalewicz Z. Parameter control in evolutionary algorithms // IEEE Trans. Evolutionary Algorithms. 1999. Vol. 3. P. 124–141.

11. Antamoshkin A., Semenkin E. Local Search Efficiency when Optimizing Unimodal Pseudoboolean Functions // Informatica. 1998. Vol. 9. № 3. P. 279–296.

12. Бежитский С. С., Семенкин Е. С., Семенкина О. Э. Гибридный эволюционный алгоритм для выбора эффективных вариантов систем управления космическими аппаратами // Автоматизация и соврем. технологии. 2005. № 11.

13. Yakimov Y., Semenkin E., Yakimov I. Hybrid genetic algorithm for a full-profile analysis of XRD powder patterns // Acta Cryst. A64. C226. 2008.

14. Schlierkamp-Voosen D., Mühlenbein H. Strategy adaptation by competing subpopulations // Parallel Problem Solving from Nature III. Springer-Verlag, 1994.

15. Potter M. A., De Jong K. A. Cooperative coevolution: an architecture for evolving coadapted subcomponents // Trans. Evolutionary Computation. 2000. Vol. 8. P. 1–29.

16. Rosin C., Belew R. New Methods for Competitive Coevolution // Trans. Evolutionary Computation. 1997.

17. Sergienko R., Semenkin E. Competitive Cooperation for Strategy Adaptation in Coevolutionary Genetic Algorithm for Constrained Optimization // IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'2010). Barcelona, Spain, 2010. P. 1626–1631.

18. Семенкин Е. С., Сопов Е. А. Вероятностные эволюционные алгоритмы для оптимизации сложных систем // Сб. тр. междунар. конф. «Intelligent systems» (AIS’05) and «Intelligent CAD» (CAD-2005) : в 3 т. Т. 1. М. : Физматлит, 2005.

19. Galushin P. V., Semenkin E. S. Asymptotic probabilistic genetic algorithm // Vestnik. Sci. J. of Siberian State Aerospace Univ. named after academician M. F. Reshetnev. Vol. 5 (26). 2009. P. 45–49.

S. G. Zablotskiy, E. S. Semenkin, A. V. Shvets

COEVOLUTIONARY ASYMPTOTIC GENETIC ALGORITHM FOR SYLLABLE MODEL BASED IDENTIFICATION OF SENTENCES IN AUTOMATIC RECOGNITION OF CONTINUOUS SPEECH

The last stage of the syllable based automatic continuous speech recognition is the concatenation of the recognized syllables into a sequence of words. A method for solving this problem is suggested and investigated in the article. It is based on a specially designed stochastic optimization algorithm which is able to determine the most likely sentence corresponding to acoustic signal within an acceptable time frame.

Keywords: coevolutionar algorithm, syllable based model, speech recognition, dynamic programming.

© Заблоцкий С. Г., Семенкин Е. С., Швец А. В., 2011

УДК 004.738.52

И. Н. Зябрев, К. Н. Василенко, О. В. Пожарков, И. Н. Пожаркова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ И ДРУГИХ МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА

Проведено сравнение спектральной языковой модели (SLM) с наиболее широко используемыми в информационном поиске моделями, такими как DFR (Difference From Randomness) и BM25 с точки зрения оценки качества решения поисковых задач.

Ключевые слова: информационный поиск, вероятностная модель, SLM.

Классическая задача информационного поиска формулируется в следующем виде. Существует множество (коллекция) документов D (d_1, d_2, … d_M); M – его мощность и формализованный запрос q, выражающий информационные потребности пользователя поисковой системы. Требуется найти документы коллекции D, удовлетворяющие запросу q. Решение задачи обычно представляет собой список документов D_{rel}, в порядке убывания их степени соответствия запросу (релевантности).

В настоящее время большинство алгоритмов оценки релевантности документов построено на основе таких моделей, как BM25 [1] и DFR [2]. К основным достоинствам данных моделей можно отнести довольно высокое качество решения поисковых задач, малую вычислительную сложность и небольшой размер частотной базы, необходимой для вычисления оценок релевантности документов. Среди наиболее существенных недостатков большинства моделей информационного поиска, в частности, BM25 и DFR, стоит выделить унифицированное взвешивание отдельных слов документа, которое приводит к тому, что слова, имеющие одинаковые частоты в оцениваемом документе и во всей коллекции, будут давать одинаковый вклад в оценку релевантности, несмотря на их различную информационную значимость. Спектральная языковая модель (SLM) [3] учитывает распределение слов по всем документам коллекции и этим существенно отличается от указанных моделей, позволяя учитывать статистическую значимость слов при оценке релевантности (взвешивании) документа. Для того чтобы оценить, как такое свойство модели влияет на качество решения поисковых задач, был проведен сравнительный анализ SLM и наиболее широко используемых в данный момент вероятностных моделей: BM25 и DFR.

Описание спектральной языковой модели (SLM). Имеется множество слов $W(w_1, w_2, ..., w_N)$ и множество документов коллекции $D(d_1, d_2, … d_M)$, N и M – соответственно их мощности. Для каждой пары «слово–документ» определена нормализованная частота:

$$nTF(w_i, d_j) = TF(w_i, d_j)/\text{len}(d_j),$$

где $TF(w_i,d_j)$ – частота слова w_i в документе d_j; $\text{len}(d_j)$ – длина документа d_j в словах; $i = 1...N$, $j = 1...M$.

Тогда спектральная частота ($SF(w, F)$) слова w представляет собой число документов, в которых w имеет нормализованную частоту, равную F:

$$– SF(w, TF) = \{D:nTF(w, d_j) = F\},$$

где {*} – оператор мощности множества.

Множество спектральных частот, определенных над областью значений $nTF \in [0,1]$, образует частотный спектр слова.

Базовой характеристикой, на основе которой решаются задачи информационного поиска в различных моделях, является вес слова w в документе d. В спектральной модели она определяется по формуле

$$\text{SLM}(w, d) = \log(M/SF(w, nTF(w, d)).$$

Оценка релевантности документа d относительно запроса q определяется по формуле

$$\mathrm{Re}\,l(q,d)=\sum_{L\in q}\mathrm{SLM}(L,d),$$

где L – лемма (каноническая форма) слова запроса.

Так как nTF – величина непрерывная, то для построения базы нормализованных частот область значений была разбита на интервалы длиной 0,001. Такая избыточная разрешающая способность была выбрана с целью решения в дальнейшем задачи оптимального разбиения на интервалы.

Последующие исследования показали, что уменьшение интервала разбиения или усреднение значений спектральных частот из окрестности nTF заданной ширины приводит к ухудшению результатов поиска, однако даже при увеличении шага дискретизации до 0,01 качество решения поисковых задач остается достаточно высоким по сравнению с другими моделями.

Сравнение SLM с вероятностными моделями BM25 и DFR. Для независимого оценивания спектральной модели в рамках российского семинара по оценке методов информационного поиска было проведено сравнение двух поисковых алгоритмов: на базе SLM и BM25 [3]. По каждому из них были получены ответы на более чем 40 тысяч предложенных запросов по коллекции из 5 миллионов документов. Оценка ответов проводилась асессорами по методу общего котла. Алгоритм на основе SLM показал практически по всем видам оценок существенно лучшие результаты по сравнению с BM25 (табл. 1).

Однако в сравнении, проведенном на РОМИП-2010, участвовали модели BM25 и SLM не в чистом виде, так как для улучшения качества ранжирования использовался аддитивный алгоритм оценки релевантности документа с использованием весов, вычисленных по различным структурным элементам документов. Поэтому чтобы исключить влияние подобных факторов, было проведено дополнительное исследование моделей на основе таблиц релевантностей РОМИП за 2007–2010 гг.

Для каждой модели (DFR, BM25, SLM) в сравнении было использовано по 2 ранжирующих алгоритма:

– оценка релевантности документа определяется только по исследуемой модели:

$$R_1(q,d)=M_{\mathrm{doc}}(q,d),$$

где q – запрос; d – оцениваемый документ;

– оценка релевантности документа определяется по различным структурным элементам документа:

$$R_2(q,d)=k_{\mathrm{doc}}M_{\mathrm{doc}}(q,d)+$$
$$+k_{\mathrm{title}}M_{\mathrm{title}}(q,d)+k_{\mathrm{begin}}M_{\mathrm{begin}}(q,d),$$

где k_{doc}, k_{title}, k_{begin} – коэффициенты, полученные на основе машинного обучения; обучение проводилось независимо для каждой модели на основе таблиц релевантностей; $M_{\mathrm{doc}}(q, d)$ – вклад всего документа в оценку его релевантности; $M_{\mathrm{title}}(q, d)$ – вклад заголовка документа; $M_{\mathrm{begin}}(q, d)$ – вклад начальной части документа; для SLM: $M(q,d)=\sum_{L\in q}\mathrm{SLM}(L,d)$; для BM25: $M(q,d)=\sum_{L\in q}\mathrm{BM25}(L,d)$; для DFR: $M(q,d)=\sum_{L\in q}\mathrm{DFR}(L,d)$;

Полученные на запросы ответы по каждому алгоритму оценивались по таблицам релевантостей. Результаты оценок представлены в табл. 2–3.

Как видно, по обоим алгоритмам лучшие результаты по всем оценкам получила спектральная модель. В среднем оценки SLM выше на 10 %, чем у BM25, и на 13 %, чем у DFR, что считается существенной разницей. На рисунке представлен график TREC для ответов по алгоритму R_1.

Таблица 1

Результаты сравнения ранжирующих алгоритмов на РОМИП-201

Evaluation\System	BM25	SLM
Average precision	0,455	0,466
Bpref	0,416	0,437
Bpref-10	0,514	0,522
Precision(1)	0,372	0,442
Precision(10)	0,347	0,353
Precision(5)	0,372	0,395
Reciprocal Rank	0,503	0,54
R-precision	0,439	0,456
NDCG@5	0,316	0,336
DCG@5	1,091	1,186
NDCG@10	0,415	0,435
DCG@10	1,608	1,689

Таблица 2

Результаты сравнения алгоритмов R_1

Evaluation\Systems	DFR	BM25	SLM
Average precision	0,224	0,226	0,256
Bpref	0,551	0,555	0,595
Bpref-10	0,64	0,643	0,685
Precision(1)	0,454	0,472	0,522
Precision(10)	0,442	0,46	0,51
Precision(5)	0,444	0,464	0,514
Reciprocal Rank	0,458	0,48	0,53
R-precision	0,28	0,296	0,32
NDCG@5	0,242	0,257	0,282
DCG@5	0,835	0,863	0,961
NDCG@10	0,330	0,339	0,366
DCG@10	1,306	1,315	1,451

Таблица 3

Результаты сравнения алгоритмов R_2

Evaluation\Systems	DFR	BM25	SLM
Average precision	0,26	0,266	0,296
Bpref	0,678	0,685	0,748
Bpref-10	0,782	0,788	0,858
Precision(1)	0,522	0,538	0,588
Precision(10)	0,512	0,53	0,576
Precision(5)	0,514	0,53	0,58
Reciprocal Rank	0,322	0,34	0,357
R-precision	0,526	0,542	0,597
NDCG@5	0,379	0,387	0,435
DCG@5	1,203	1,231	1,406
NDCG@10	0,467	0,478	0,524
DCG@10	1,772	1,802	2,026

Из графика также видно, что точность результатов поиска при одинаковых значениях полноты у алгоритма на основе SLM выше по сравнению с DFR и BM25.

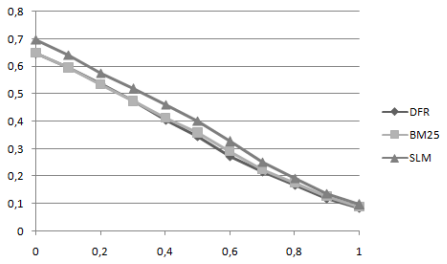


График TREC ответов по алгоритму R_1

В целом, полученные результаты свидетельствуют, что спектральная модель по крайней мере на русскоязычных документах дает более качественное решение поисковых задач.

Проведенные исследования говорят о том, что спектральный подход в оценивании релевантностей документов дает более качественное решение поисковых задач в сравнении с другими методами. Кроме того, SLM является непараметрической моделью, т. е. не требует настройки или машинного обучения, в отличие от многих других моделей, используемых в задачах информационного поиска. Однако спектральная модель обладает существенным недостатком – очень большим размером частотной базы. Если в большинстве вероятностных моделей на каждое слово в частотную базу заносится не более двух параметров, то здесь их число существенно больше. Одним из способов уменьшения базы может быть выбор большего шага дискретизации. Однако проведенные исследования показали, что спектры слов можно аппроксимировать с минимальными потерями качества решения поисковых задач функцией от трех аргументов, в частности, функцией вида $aSF(nTF, a, b) = a \cdot nTF^b$, $b < 0$, где a и b – параметры, которые определяются для каждого слова на основе метода наименьших квадратов. При этом сохраняется свойство уникальности спектра слов, а размер частотной базы существенно сокращается: на каждое слово необходимо хранить по два параметра.

Библиографические ссылки

1. Okapi at TREC-3 / S. Robertson, S. Walker, M. Hancock-Beaulieu, M. Gatford // Proc. of the Third Text Retrieval Conf. 1994. P. 109–126.

2. Amati G., Van Rijsbergen C. J. Probabilistic models of information retrieval based on measuring the divergence from randomness // The Information Retrieval Group. 2002. № 20(4). P. 357–389.

3. Зябрев И. Н., Пожарков О. В., Пожаркова И. Н. Использование спектральных характеристик лексем для улучшения поисковых алгоритмов // Тр. РОМИП. 2010. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2010. С. 40–48.

I. N. Zyabrev, K. N. Vasilenko, O. V. Pozharkov, I. N. Pozharkova

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECTRAL LANGUAGE MODEL AND OTHER INFORMATION RETRIEVAL MODELS

Comparison of spectral language model (SLM) with models most widely used in information retrieval, such as DFR (Difference From Randomness) and BM25 by quality estimation of the search problems decision.

Keywords: information retrieval, probability model, SLM.

© Зябрев И. Н., Василенко К. Н., Пожарков О. В., Пожаркова И. Н., 2011

УДК 658.512.001.56

М. В. Карасева, Д. В. Кустов

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС В МУЛЬТИЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ АДАПТИВНО-ОБУЧАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ*

Рассмотрено функциональное назначение и структура программной системы TuMLas v.1,0, реализующей программно-алгоритмическое обеспечение мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии. Представлена реляционная модель структуры информационно-терминологического базиса, а также структура первичного информационно-терминологического базиса в виде концептуальной ER-диаграммы.

Ключевые слова: мультилингвистическая технология, программная система, ER-диаграмма.

Одним из ключевых моментов в обучении иностранному языку является изучение иностранной лексики. В этом случае направленная методика обучения подразумевает создание профессионально ориентированных словарей. Если словарь исполнен в классическом виде, то термины в нем располагаются в алфавитной последовательности. Это упрощает их поиск, но никоим образом не повышает эффективность обучения при использовании такого словаря.

С этой целью разработана мультилингвистическая адаптивно-обучающая технология [1], которая рассматривает свойства лексем применительно к конкретным предметным областям, что позволяет для каждой области сформировать информационный терминологический базис (ИТБ) [2]. На основе данных о его элементах становится возможным принять решение о той или иной структуре профессионально ориентированного словаря или же самого ИТБ.

Вопрос об эффективной организации ИТБ нашел решение в ряде методов оптимизации [3], но ни один из этих методов до сих пор не учитывал ассоциативные связи между лексемами (понятиями) того или иного языка.

Такие методы были разработаны и реализованы в программной системе TuMLas v.1,0 [4].

Функциональное назначение программной системы заключается в осуществлении программно-алгоритмической поддержки мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии. TuMLas v.1,0 является высококачественным инструментом построения мультилингвистического ИТБ на основе новейших методов оптимизации его структуры [5].

Система работает в двух взаимосвязанных режимах, каждый из которых соответствует ее отдельной функции и обеспечивается отдельным функциональным блоком. Это режим анализа текстов и последующей генерации первичного информационно-терминологического базиса; режим формирования целевого (пригодного для использования в процессе обучения) информационно-терминологического базиса путем реорганизации структуры первичного базиса, в том числе с помощью методов оптимизации его структуры.

Структура разработанной программной системы представлена на рис. 1.

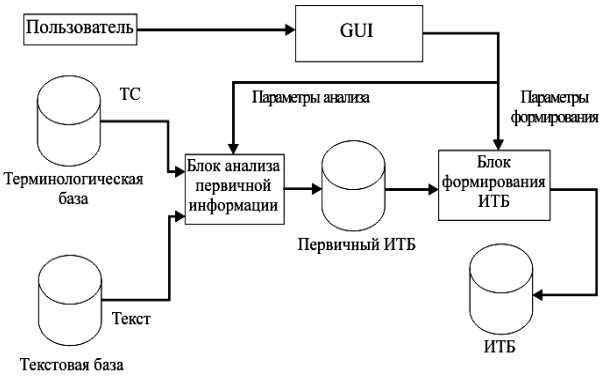


Рис. 1. Структура программной системы TuMLas v.1,0

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» 2011-1.9-519-005.

Блок анализа первичной информации (БАПИ) и блок формирования ИТБ составляют основу системы и обеспечивают ее работу.

Кратко рассмотрим каждый из них.

Согласно рис. 1, на вход БАПИ подается текст интересующей нас предметной области и терминологический словарь (ТС) этой же области.

Управляющее воздействие осуществляется пользователем, который через графический пользовательский интерфейс (GUI) задает соответствующие параметры. Такими параметрами могут быть следующие [4]:

– язык текста;

– режим обработки лексических конструкций (по умолчанию зависит от языка текста и служит для нахождения семантического соответствия);

– режим генерации базиса (замена/дополнение) и т. п.

Выходом БАПИ является первичный ИТБ. Его структура в виде концептуальной ER-диаграммы изображена на рис. 2.

Рис. 2. Концептуальная ER-диаграмма структуры первичного информационно-терминологического базиса

Таким образом, для каждого языка формируется набор лексем некоторой предметной области, учитывая их частотные [2] и ассоциативные характеристики [6]. Каждой полученной лексеме ставится в соответствие набор ассоциативно связанных с ней лексем – лексем реляционного ряда [5], также принадлежащих данной предметной области.

Полученный ИТБ не является непосредственно объектом изучения при обучении иностранной лексике, но он содержит достаточную информацию, для того чтобы такой базис построить.

Построение целевого ИТБ осуществляется блоком формирования ИТБ (см. рис. 1).

На вход блока подается сгенерированный БАПИ первичный ИТБ. Управляющее воздействие, аналогично рассмотренному в БАПИ, осуществляется пользователем через GUI (задаются параметры формирования ИТБ).

Такими параметрами могут быть следующие:

– языковой состав целевого ИТБ;

– методы формирования структуры базиса и т. д.

Блок формирования ИТБ содержит различные вариации методов:

– частотного построения ИТБ [2];

– оптимального разбиения ИТБ на блоки и модули [3];

– реализации реляционной модели структуры ИТБ [5].

Применение этих методов как отдельно друг от друга, так и в различных сочетаниях позволяет значительно снизить трудоемкость прохождения целевого базиса и повысить эффективность использующей его системы обучения в целом [5].

В отличие от подобных, ранее разработанных систем, TuMLas v.1,0 позволяет при формировании ИТБ учитывать ассоциативные связи между элементами базиса. Структура ИТБ в данном случае формируется согласно реляционной модели (рис. 3) [5].

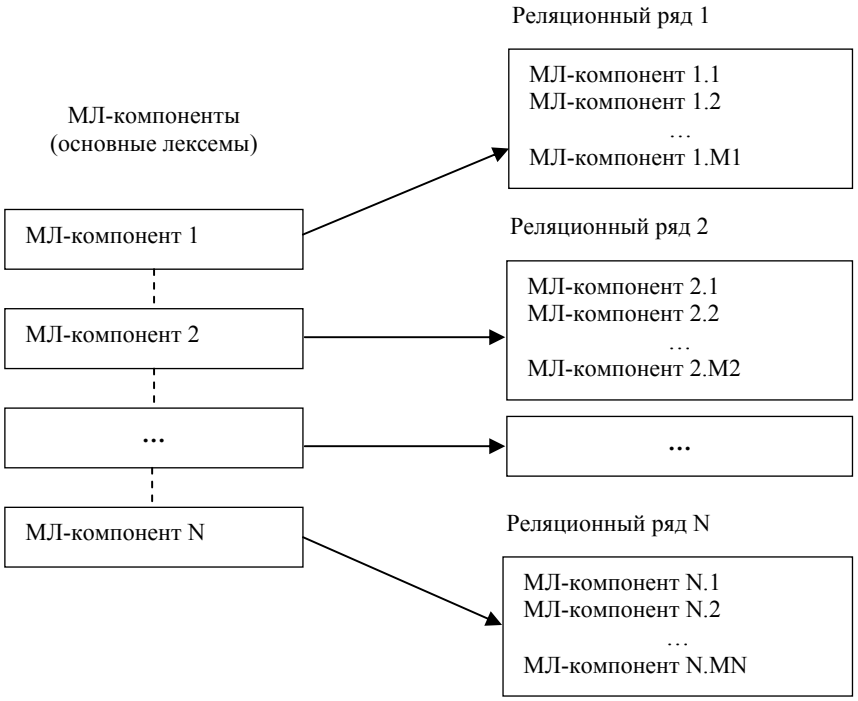


Рис. 3. Реляционная модель структуры ИТБ

По своим частотным характеристикам все лексемы ИТБ разделяются на две группы: 1) лексемы, имеющие наибольшую частоту (основные лексемы); 2) лексемы, частота которых не превышает некоторого числового порога. Из них впоследствии формируются реляционные ряды, каждый из которых однозначно соответствует одной из основных лексем.

При этом структура МЛ-компонента [7], отражающего основную лексему, дополняется соответствующими переходными вероятностями.

Построение ИТБ согласно реляционной модели позволяет значительно снизить трудоемкость его прохождения и увеличить эффективность системы обучения в целом. При этом применение реляционной модели хорошо сочетается с другими методами оптимизации структуры ИТБ, в частности с методами оптимального разбиения ИТБ на блоки и модули [5].

Библиографические ссылки

1. Ковалев И. В., Усачев А. В. Мультилингвистический метод изучения иностранной терминологической лексики на базе мнемотехнического подхода // Первая Всерос. науч. интернет-конф. «Соц.-психол. пробл. развития личности». Вып. 4. Тамбов : ТГУ, 2001. С. 57.

2. Карасева М. В., Ковалев И. В., Суздалева Е. А. Модель архитектуры мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии // Новые информ. технологии в унив. образовании : тез. междунар. науч.-метод, конф. Кемерово : КемГУ и ИДМИ, 2002. С. 204–205.

3. Огнерубов С. С. Алгоритмы оптимизации блочно-модульной структуры информационно-терминологического базиса // Вестн. унив. комплекса. Вып. 20. 2006. С. 104–118.

4. Программа анализа и формирования информационного мультилингвистического терминологического базиса, на основе реляционной модели оптимизации, TuMLas v.1,0 : программа для ЭВМ : свидетельство об офиц. регестрации № 50200701261 / В. О. Лесков, И. В. Ковалев. Зарегистр. ВНТИЦ. 2010.

5. Лесков В. О., Огнерубов С. С. Реляционная модель и алгоритмы оптимизации модульной структуры мультилингвистического информационно-терминологического базиса // Вестн. унив. комплекса. Вып. 21. 2009. С. 116–133.

6. Лесков В. О. Система предварительной обработки текстов, основанная на скрытой марковской модели, в контексте мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии // Вестн. унив. комплекса. Вып. 23. 2006. С. 110–119.

7. Ковалев И. В., Карасева М. В., Суздалева Е. А. Системные аспекты организации и применения мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии // Образоват. технологии и общество – Educational Technology & Society. Вып. 5(2). 2002. С. 198–212.

M. V. Karaseva, D. V. Kustov

INFORMATIONAL AND TERMINOLOGICAL BASIS IN MULTILINGUAL ADAPTIVE-TRAINING TECHNOLOGY

The paper considers functional assignment and structure of the algorithmic software of the multilingual adaptive-training technology. It is realized as a program system TuMLas v. 1,0. The relation model of the informational and terminological basis structure and the initial informational and terminological basis structure are presented as a conceptual ER-diagram.

Keywords: multilingual technology, software system, ER-diagram.

© Карасева М. В., Кустов Д. В., 2011

УДК 517.552

А. С. Кацунова

О ПОВТОРНОМ ОСОБОМ ИНТЕГРАЛЕ КОШИ–СЕГЕ

Получен аналог формулы Пуанкаре–Бертрана для особого интеграла Коши–Сеге в шаре. Главное значение интеграла рассмотрено в смысле Керзмана–Стейна.

Ключевые слова: интеграл Коши–Сеге, главное значение особого интеграла в смысле Керзмана–Стейна, формула перестановки повторного интеграла.

Будем рассматривать n-мерное комплексное пространство $\mathbf{C}^n$ $(n>1)$ переменных $z=(z_1,\ldots,z_n)$. Если $z,w\in\mathbf{C}^n$, то $\langle z,w\rangle = z_1w_1+\ldots+z_nw_n$, а $|z|=\sqrt{\langle z,z\rangle}$, где $\overline{z}=(\overline{z}_1,\ldots,\overline{z}_n)$.

Пусть $B_z(\varepsilon)$ – шар в $\mathbf{C}^n$ с центром в точке z радиуса ε, т. е.

$$B_z(\varepsilon)=\left\{\varsigma\in\mathbf{C}^n:\ |\varsigma-z|<\varepsilon\right\}.$$

Тогда B – единичный шар из $\mathbf{C}^n$, а именно

$$B = B_0(1) = \{\zeta : \ |\zeta| < 1\},$$

а S – граница шара B:

$$S = \{\zeta : \ |\zeta| = 1\}.$$

Обозначим через $K(\zeta, z)$ ядро интеграла Коши–Сеге для шара, т. е.

$$K(\zeta, z) = \frac{1}{\left(1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right)^n},$$

а через $\sigma(\zeta)$ дифференциальную форму

$$\sigma(\zeta) = \frac{(n-1)!}{(2\pi i)^n} \sum_{k=1}^{n} (-1)^{k-1} \overline{\zeta}_k \, d\overline{\zeta}[k] \wedge d\zeta,$$

где $d\overline{\zeta}[k] = d\overline{\zeta}_1 \wedge \ldots \wedge d\overline{\zeta}_{k-1} \wedge d\overline{\zeta}_{k+1} \wedge \ldots \wedge d\overline{\zeta}_n$, $d\zeta = d\zeta_1 \wedge \ldots \wedge d\zeta_n$.

Для любых точек $\zeta, z \in S$ выполняются соотношения [1; 2]

$$C_1 \left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right| \le |\zeta - z| \le C_2 \sqrt{\left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right|}. \qquad (1)$$

Интегральное представление Коши–Сеге. *Теорема 1* [3]. Для любой функции f, голоморфной в B и непрерывной в $\overline{B}$, справедлива формула

$$f(z) = \int_S f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta), \quad z \in B.$$

Рассмотрим для точек $z \in S$ главное значение в смысле Керзмана–Стейна [1; 2]:

$$v.p.h. \int_S f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta) = \lim_{\varepsilon \to 0} \int_{S \setminus E_z(\varepsilon)} f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta),$$

где $E_z(\varepsilon) = \{\zeta : \ \left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right| < \varepsilon\}$. Оно отличается от обычного главного значения $v.p.$ по Коши тем, что из границы области выбрасывается не шар $B_z(\varepsilon)$, а «эллипсоид» $E_z(\varepsilon)$. Далее в работе для точек $z \in S$ будем рассматривать главное значение в смысле Керзмана–Стейна и знак $v.p.h.$ будем иногда опускать.

Теорема 2 [1; 2]. При $n > 1$ справедлива формула

$$v.p.h. \int_S f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta) = \frac{1}{2}, \ z \in S.$$

Обозначим для интегрируемой на S функции f предельное значение интеграла

$$\int_S f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta)$$

изнутри шара B через $K^+[f]$.

Функция f удовлетворяет на S условию Гельдера с показателем α, $0 < \alpha \le 1$, (т. е. $f \in C^\alpha(S)$), если для точек ζ, $z \in S$ выполняется неравенство [2]:

$$\left|f(\zeta) - f(z)\right| \le C \left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right|^\alpha.$$

Заметим, если функция f удовлетворяет на S условию Гельдера относительно метрики $\left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right|$, то она также будет удовлетворять условию Гельдера относительно метрики $|\zeta - z|$ с тем же показателем (так как верно соотношение (1).

Теорема 3 [1; 2]. Если $f \in C^\alpha(S)$, $0 < \alpha \le 1$, то интеграл $K^+[f]$ непрерывно продолжается на $\overline{B}$ и $K^+[f] \in C^\alpha(S)$ и справедливо равенство

$$K^+[f] = v.p.h. \int_S f(\zeta) K(\zeta, z) \sigma(\zeta) + \frac{f(z)}{2}, \quad z \in S.$$

Целью работы является получение аналога формулы Пуанкаре–Бертрана для особого интеграла Коши–Сеге в случае, когда главное значение особого интеграла рассматривается в смысле Керзмана–Стейна.

Вспомогательные результаты. Следствием оценок, приведенных в [4], являются леммы 1 и 2.

Лемма 1. Пусть $f \in C^\alpha(S \times S)$, тогда для $z \in S$

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\zeta} f(\zeta, w) K(\zeta, z) \ \sigma(\zeta) = \int_{S_\zeta} K(\zeta, z) \ \sigma(\zeta) \int_{S_w} f(\zeta, w) \ d\sigma(w),$$

где $d\sigma(w)$ – мера Лебега на S.

Лемма 2. Пусть $f \in C^\alpha(S \times S)$, тогда для $z \in S$ и $0 \le \nu < n$

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\zeta} \frac{f(\zeta, z)}{\left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right|^\nu} \, d\sigma(\zeta) = \int_{S_\zeta} f(\zeta, z) \ d\sigma(\zeta) \int_{S_w} \frac{d\sigma(w)}{\left|1 - \langle \overline{\zeta}, z \rangle\right|^\nu}.$$

Теорема 4. Пусть $f(\zeta, w) = f_0(\zeta, w) \cdot |1 - \langle \overline{\zeta}, w \rangle|^{-\nu}$, $f_0(\zeta, w) \in C^\alpha(S \times S)$, $0 \le \nu < n$, тогда

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\zeta} f(\zeta, w) K(\zeta, z) \ \sigma(\zeta) = \int_{S_\zeta} K(\zeta, z) \ \sigma(\zeta) \int_{S_w} f(\zeta, w) \ d\sigma(w), \ z \in S.$$

Доказательство. Введем разбиение единицы следующим образом. Рассмотрим множество $M = \overline{B}_\zeta \times \overline{B}_w = \{(\zeta, w) : \ \zeta \in \overline{B}, \ w \in \overline{B}\}$. Введем в нем компактные окрестности M_1 множества

$\{(\varsigma, w) \in M : \varsigma = w\}$ и M_2 множества $\{(\varsigma, w) \in M : \varsigma = z\}$, пересекающиеся лишь по одной точке (z, z). Тогда открытые множества $U_1 = M \setminus M_1$ и $U_2 = M \setminus M_2$ являются покрытием множества $M \setminus \{(z, z)\}$. Пусть $\alpha_1(\varsigma, w)$ и $\alpha_2(\varsigma, w)$ – гладкое разбиение единицы, подчиненное этому покрытию, т. е. $\alpha_1 + \alpha_2 \equiv 1$ на $U_1 \cup U_2$, $0 \le \alpha_1 \le 1$, $0 \le \alpha_2 \le 1$. Тогда $\alpha_1(\varsigma, w) \equiv 0$ в окрестности точки $\varsigma = w$ при фиксированном $w \ne z$, $\alpha_1(z, w) = 1$, а $\alpha_2(\varsigma, w) \equiv 0$ в окрестности точки $\varsigma = z$ и $\alpha_2(w, w) = 1$.

Тогда

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} f(\varsigma, w) K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \big(\alpha_1(\varsigma, w) + \alpha_2(\varsigma, w)\big)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) +$$

$$+ \int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_2(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma).$$

Рассмотрим интеграл

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma).$$

Так как $\alpha_1(\varsigma, w) = 0$ в области $S_\varsigma \cap E_w(\varepsilon)$, то в последнем интеграле, применив лемму 1, можно поменять порядок интегрирования. Тогда получим

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_\varsigma} d\sigma(w) \int_{S_w} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma).$$

Рассмотрим интеграл

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_2(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma).$$

Так как $\alpha_2(\varsigma, w) = 0$ в области $S_\varsigma \cap E_z(\varepsilon)$, то, применив лемму 2, можно поменять порядок интегрирования:

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_2(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_\varsigma} K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) \int_{S_w} \alpha_2(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, d\sigma(w).$$

Таким образом,

$$\int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) +$$

$$+ \int_{S_w} d\sigma(w) \int_{S_\varsigma} \alpha_2(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_\varsigma} K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) \int_{S_w} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, d\sigma(w) +$$

$$+ \int_{S_\varsigma} K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) \int_{S_w} \alpha_1(\varsigma, w)\, f(\varsigma, w)\, d\sigma(w) =$$

$$= \int_{S_\varsigma} K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) \int_{S_w} \big(\alpha_1(\varsigma) + \alpha_2(\varsigma)\big)\, f(\varsigma, w)\, d\sigma(w) =$$

$$= \int_{S_\varsigma} K(\varsigma, z)\, \sigma(\varsigma) \int_{S_w} f(\varsigma, w)\, d\sigma(w).$$

Лемма 3. Для точек $z^0, \varsigma^0 \in S$ справедливо равенство

$$\int_S K(w, z^0) K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w) = 0, \quad z^0 \ne \varsigma^0.$$

Доказательство. Рассмотрим разбиение единицы, аналогичное разбиению из предыдущей теоремы. Рассмотрим множество $M = \overline{B}$. Введем в нем компактные окрестности M_1 множества $\{w \in M : w = \varsigma^0\}$ и M_2 множества $\{w \in M : w = z^0\}$. Тогда открытые множества $U_1 = M \setminus M_1$ и $U_2 = M \setminus M_2$ являются покрытием множества M. Пусть $\alpha_1(w)$ и $\alpha_2(w)$ – гладкое разбиение единицы, подчиненное этому покрытию, т. е. $\alpha_1 + \alpha_2 \equiv 1$ на $U_1 \cup U_2$, $0 \le \alpha_1 \le 1$, $0 \le \alpha_2 \le 1$. Тогда $\alpha_1(w) \equiv 0$ в окрестности точки $w = \varsigma^0$ при фиксированном $\varsigma^0 \ne z^0$, $\alpha_1(z^0) = 1$, а $\alpha_2(w) \equiv 0$ в окрестности точки $w = z$ и $\alpha_2(\varsigma^0) = 1$.

Тогда

$$\int_S K(w, z^0)\ K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w) =$$

$$= \int_S \big(\alpha_1(w) + \alpha_2(w)\big)\, K(w, z^0)\ K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w) =$$

$$= \int_S \alpha_1(w)\, K(w, z^0)\ K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w) +$$

$$+ \int_S \alpha_2(w)\, K(w, z^0)\ K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w).$$

Преобразуем каждое слагаемое отдельно, воспользовавшись теоремой 3 и учитывая, что $\alpha_1(z^0) = 1$, $\alpha_2(\varsigma^0) = 1$, $\overline{\sigma(w)}\big|_S = \sigma(w)\big|_S$ и $K(\varsigma, w) = \overline{K(w, \varsigma)}$:

$$\int_S \alpha_1(w)\, K(w, z^0)\ K(\varsigma^0, w)\, \sigma(w) =$$

$$= \lim_{z \to z^0 \in S} \int_S \alpha_1(w)\, K(\varsigma^0, w)\ K(w, z) \sigma(w) - \frac{\alpha_1(z^0) K(\varsigma^0, z^0)}{2} =$$

$$= \lim_{\substack{z \to z^0 \in S \\ \varsigma \to \varsigma^0 \in S}} \int_S \alpha_1(w)\, K(\varsigma, w)\ K(w, z) \sigma(w) - \frac{K(\varsigma^0, z^0)}{2},$$

$$\int_S \alpha_2(w)\ K(w,z^0)\ K(\varsigma^0,w)\ \sigma(w) =$$

$$= \int_S \alpha_2(w)\ K(w,z^0)\ \overline{K(w,\varsigma^0)}\ \sigma(w) =$$

$$= \overline{\int_S \overline{\alpha_2(w)\ K(w,z^0)}\ K(w,\varsigma^0)\ \sigma(w)} =$$

$$= \lim_{\varsigma\to\varsigma^0\in S} \overline{\int_S \overline{\alpha_2(w)\ K(w,z^0)}\ K(w,\varsigma)\ \sigma(w)} - \frac{\overline{\overline{\alpha_2(\varsigma^0)K(\varsigma^0,z^0)}}}{2} =$$

$$= \lim_{\varsigma\to\varsigma^0\in S} \int_S \alpha_2(w)\ K(w,z^0)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(w) - \frac{K(\varsigma^0,z^0)}{2} =$$

$$= \lim_{\substack{z\to z^0\in S\\ \varsigma\to\varsigma^0\in S}} \int_S \alpha_2(w)\ K(w,z)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(w) - \frac{K(\varsigma^0,z^0)}{2}.$$

Тогда, применяя теорему 1, получим

$$\int_S K(w,z^0)\ K(\varsigma^0,w)\ \sigma(w) =$$

$$= \lim_{\substack{z\to z^0\in S\\ \varsigma\to\varsigma^0\in S}} \int_S \alpha_1(w)\ K(\varsigma,w)\ K(w,z)\sigma(w) - \frac{K(\varsigma^0,z^0)}{2} +$$

$$+ \lim_{\substack{z\to z^0\in S\\ \varsigma\to\varsigma^0\in S}} \int_S \alpha_2(w)\ K(w,z)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(w) - \frac{K(\varsigma^0,z^0)}{2} =$$

$$= \lim_{\substack{z\to z^0\in S\\ \varsigma\to\varsigma^0\in S}} \int_S K(w,z)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(w) - K(\varsigma^0,z^0) =$$

$$= K(\varsigma^0,z^0) - K(\varsigma^0,z^0) = 0.$$

Основной результат. *Теорема 5.* Пусть $f \in C^{\alpha}(S\times S)$, тогда для $z \in S$

$$\int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} f(\varsigma,w)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_\varsigma}\int_{S_w} f(\varsigma,w)\ K(w,z)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma)\ \sigma(w) + \frac{f(z,z)}{4}.$$

Доказательство. Преобразуем интеграл следующим образом:

$$\int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} f(\varsigma,w)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) =$$

$$= \int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} \big(f(\varsigma,w) - f(w,w)\big)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) +$$

$$+ \int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} \big(f(w,w) - f(z,w)\big)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) +$$

$$+ \int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} \big(f(z,w) - f(z,z)\big)\ K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) +$$

$$+ f(z,z) \int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma).$$

В первых трех интегралах по теореме 4 можно поменять порядок интегрирования. По теореме 2

$$\int_{S_w} K(w,z)\ \sigma(w) \int_{S_\varsigma} K(\varsigma,w)\ \sigma(\varsigma) = \frac{1}{4},$$

а по лемме 3

$$\int_{S_\varsigma}\int_{S_w} K(w,z)K(\varsigma,w)\ \sigma(w)\ \sigma(\varsigma) = 0.$$

Тем самым доказан аналог формулы Пуанкаре–Бертрана для особого интеграла Коши–Сеге и для главного значения в смысле Керзмана–Стейна.

Библиографические ссылки

1. Kerzman N., Stein E. M. The Szego kernel in terms of Cauchy-Fantappie kernels // Duke Math. J. 1978. Vol. 45. № 3. P. 197–224.

2. Alt W. Singulare integrale mit gemischten homogenitaten auf mannigrfaltigkeiten und anwendungen in der funktionentheorie // Math. Zeit. 1974. B. 137. № 3. S. 227–256.

3. Рудин У. Теория функций в единичном шаре из $\mathbf{C}^n$. М. : Мир, 1984.

4. Кацунова А. С. О формуле перестановки повторного особого интеграла Бохнера–Мартинелли в строго псевдовыпуклых областях // Журн. СФУ. Математика и физика. 2011. Т. 4(1). С. 102–111.

A. S. Katsunova

ON ITERATIVE SINGULAR CAUCHY-SZEGO INTEGRAL

The article presents an obtained Poincare–Bertrand formula analog for Cauchy–Szego integral in a full-sphere. Principal value of integral in terms of Kerzman–Stein is considered in the article.

Keywords: Cauchy–Szego integral, principal value of integral in terms of Kerzman–Stein, formula of change of integration order for iterative integral.

© Кацунова А. С., 2011

УДК 519.95 + 621

В. Д. Кошур, М. С. Фадеева

НЕЙРОУПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ

Представлены результаты исследований по нейроуправлению параметрами активных акустических источников для снижения давления в заданной части расчетной области. Проведенные вычислительные эксперименты показали достаточную эффективность использования нейросетевого управления.

Ключевые слова: численное моделирование, активное гашение звука, нейроуправление.

Шум является одним из неблагоприятных факторов окружающей среды. Для уменьшения шума применяются как пассивные средства (звукопоглощающие материалы), так и активные методы подавления шума, основанные на взаимодействии пассивных акустических волн и волн от активных источников, которые, например, генерируют соответствующие волны в противофазе.

Современные схемы активного гашения звука представляют собой достаточно сложные адаптивные системы [1–3], которые позволяют снижать интенсивность акустических полей в заданной области, уменьшать излучаемую звуковую энергию в целом и осуществлять адаптивное управление в зависимости от поставленных задач. Следует отметить перспективность нейросетевых методов управления активными акустическими источниками, которые после настройки и обучения управляющих нейросетевых блоков обладают высокой скоростью обработки информации и позволяют управлять снижением шума в режиме реального времени.

Численное моделирование распространения и взаимодействия акустических волн проводится на основе численной схемы С. К. Годунова [4] в двумерной постановке. Рассматривается прямоугольная область D (10 × 2,5 м), на границах области предполагается полное отражение акустических волн. Для расчета используется двумерная сетка элементов Δ_{ij} с параметрами $h_x = h_y = 0{,}1$ м; $i = 1{,}2, \ldots, 100$; $j = 1{,}2, \ldots 25$ (рис. 1).

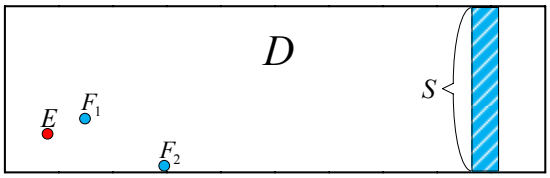


Рис. 1. Вид расчетной области D с выделенной подобластью S для контроля акустического давления и расположение пассивного источника E и двух активных источников F_1 и F_2

Пассивное акустическое воздействие рассматривается в ячейке $\Delta_{i^*j^*}$, где $i^* = 5$, $j^* = 5$. Источники F_1 и F_2, управляемые нейронной сетью, активные, располагаются в ячейках $\Delta_{i^{**}j^{**}}$, $i^{**} = 5$, $j^{**} = 6$ и $\Delta_{i^{***}j^{***}}$, $i^{***} = 1$, $j^{***} = 12$ соответственно. Выбор места расположения этих акустических источников для снижения уровня давления в области S исследован в [5]. Зона контроля акустического давления S определена в виде объединения ячеек $S = U\Delta_{i^{****}j}$, где $i^{****} = 90$, $j = 1{,}2, \ldots, 25$.

В ячейках воздействия источников E, F_1 и F_2 генерируется акустическое давление в виде

$$p^E(A, v, t) = A\sin(2\pi v t),$$
$$p^{F_i}(B_i, w_i, t) = B_i \sin(2\pi w_i t). \quad (1)$$

Здесь A и B_i $(i = 1{,}2)$ – амплитуды звукового давления (для того чтобы в (1) не использовать фазовый сдвиг при изменении параметров амплитуд, предполагалось, что эти параметры могут принимать как положительные, так и отрицательные значения), v и w_i $(i = 1{,}2)$ – частоты звукового давления.

Для контроля квадратичной величины звукового давления в области S рассматривается интегральная характеристика вида

$$Q(B_1, B_2, w_1, w_2, t) = \iint_S \left(p(x, y, t)\right)^2 dxdy. \quad (2)$$

Общая интегральная оценка уровня квадратичной величины давления в зоне контроля S для заданного интервала времени $[0, t^*]$ определяется в следующей форме:

$$\Psi = \int_0^{t^*} Q(B_1, B_2, w_1, w_2, t)dt. \quad (3)$$

Здесь t^* соответствует времени двукратного пробега звуковой волны вдоль расчетной области.

Из соотношений (2) и (3) следует, что среднее звуковое давление в контрольной области S площадью $\mu(S)$ с учетом его изменения во времени можно оценить по выражению

$$p^{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\Psi}{\tilde{T}\mu(S)}}. \quad (4)$$

Нейросетевое управление параметрами давления активных источников F_1 и F_2 осуществляется на основе инверсной модели объекта управления [6] (рис. 2). Представлены прямая (рис. 2, *а*) и инверсная (рис. 2, *б*) модели объекта управления.

Архитектура нейронной сети выбрана в виде обобщенной регрессионной сети [7], обладающей высокой скоростью обучения. Объект управления представляет собой двумерную акустическую модель, которой соответствует протестированный вычислительный модуль [8], разработанный на основе схемы С. К. Годунова для моделирования нестационарного распределения акустического давления $p(x, y, t)$ в расчетной области D в зависимости от варьируемых параметров A, v, B_i, w_i.

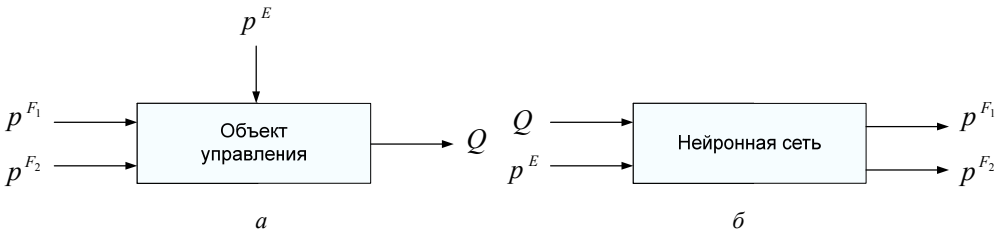


Рис. 2. Модели объекта управления:
а – прямая; *б* – инверсная

После включения блока управления на вход нейронной сети подаются изменяющаяся величина давления в пассивном источнике и нулевые значения для контролируемого параметра Q, так как это соответствует для данной модели инверсного управления максимальному снижению давления в контролируемой зоне S.

Исследование аналогичной схемы управления для одного активного источника было рассмотрено в [9]. Выходом нейронной сети является значение давлений двух акустических источников в текущий момент времени t:

$$T = \left(p_t^{F_1}, p_t^{F_2} \right) \tag{5}$$

Входной вектор имеет вид:

$$P(R) = \left[p^E_{t-4\Delta t}, p^E_{t-3\Delta t}, p^E_{t-2\Delta t}, p^E_{t-\Delta t}, p^E_t, Q_{t-4\Delta t}, Q_{t-3\Delta t}, Q_{t-2\Delta t}, Q_{t-\Delta t}, Q_t \right]^T, \tag{6}$$

где $p^E_{t-4\tau}, ..., p^E_\tau$ являются значениями пассивного источника в пять моментов времени с запаздыванием относительно текущего времени; $Q_{t-4\tau}$, …, Q_t представляют пять соответствующих значений квадратичной величины давления в зоне контроля S; Δt – время запаздывания – соответствует каждому численному шагу по времени ($\Delta t = 13t$); R – размер входных данных для нейронной сети ($R = 10$).

Обучение нейронной сети производится на предварительно сформированных данных: входных векторах P и соответствующих им выходных значениях T. Формирование набора данных осуществляется перебором параметров A, B_i, v, w_i, которые по формуле (1) определяют значения давлений пассивного и активных источников, где амплитуды A и B_1 изменяются в диапазоне [–15 Па, 15 Па] с интервалом 10 Па, амплитуда B_2 – в диапазоне [–5 Па, 5 Па] с интервалом 2,5 Па, а частоты v, w_1 и w_2 – в диапазоне [70 Гц, 130 Гц] с интервалом 30 Гц. При этом проводится численное решение по двумерной акустической модели и вычисляются значения контролируемой величины $Q(B_1, B_2, w_1, w_2, t)$ по формуле (2).

Настройка нейронной сети осуществляется подбором параметра spread [10]. Чем больше значение этого параметра, тем большее число нейронов участвует в формировании среднего значения, и наоборот. Установлено в вычислительных экспериментах, что для данной модели наиболее эффективным является значение этого параметра, равное 0,1.

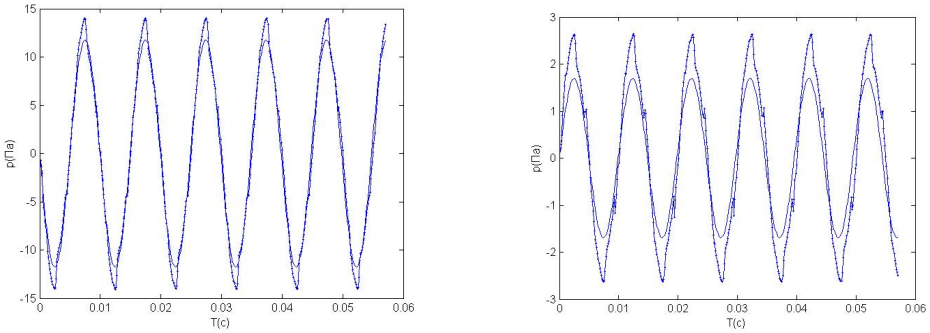
Проведенные вычислительные эксперименты позволяют сравнить результаты нейросетевого управления параметрами двух активных источников с результатами прямой минимизации акустического давления в контролируемой области S на основе гибридного генетического алгоритма [5].

Изменение давления пассивного источника E в виде $p^E(A, v, t) = 10\sin(2\pi 100t)$ не входит в обучающую выборку для нейронной сети, поэтому эффективные значения изменений активных источников определяются нейронной сетью аппроксимационно (при предполагаемых нулевых значениях параметра Q (2)). В результате расчетов получены значения численной оценки $\Psi = 1{,}279\ 1$ и среднего давления в контролируемой подобласти $p^{\text{ср}} = 0{,}010\ 7$ Па.

С помощью вычислительного эксперимента по минимизации акустического давления в части заданной области с помощью гибридного генетического алгоритма при описанной выше функции распространения давления пассивного источника установлено, что оптимальными параметрами активных источников для минимизации звукового давления в определенной зоне области являются значения: $B_1 = -11{,}76$ Па, $w_1 = 100{,}43$ Гц, $B_2 = 1{,}69$ Па, $w_2 = 101{,}01$ Гц. При этих параметрах значение численной оценки $\Psi = 0{,}23$, а среднее давление в зоне контроля $p^{\text{ср}} = 0{,}004\ 6$ Па. Графики изменения давления в активных источниках F_1 (*а*) и F_2 (*б*) при минимизации и вариант при нейроуправлении этими источниками представлены на рис. 3.

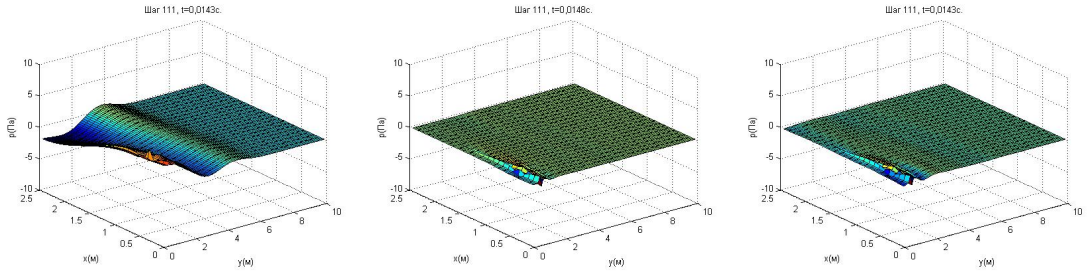
Для сравнения с результатами при отсутствии активных источников F_1 и F_2: оценка уровня давления в контролируемой подобласти составляет $\Psi = 760{,}48$, а $p^{\text{ср}} = 0{,}261\ 7$ Па.

Для наглядного представления различий распределения давления в двумерной расчетной области D на рис. 4–7 в характерные моменты времени ($t^*/4$, $t^*/2$, $3t^*/4$, t^*) приведены поверхности распределения давлений для трех вариантов расчетов: *а*) – показана поверхность изменения давления при отсутствии активных источников; *б*) представлена поверхность давления при действии активных источников с оптимальными параметрами, полученными из решения задачи минимизации звукового давления в зоне контроля на основе гибридного генетического алгоритма; *в*) представлена поверхность давления при действии активных источников, которые управляются нейросетевым блоком в режиме реального времени.



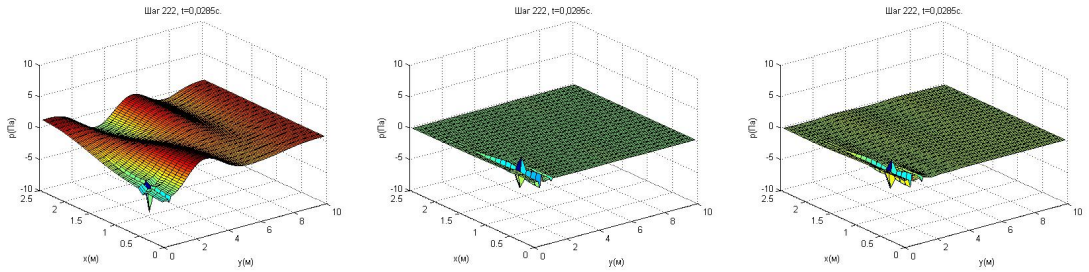
а *б*

Рис. 3. Графики сравнения изменения давления в двух активных источниках при прямой минимизации на основе гибридного генетического алгоритма и при нейроуправлении:
а – источник F_1; *б* – источник F_2



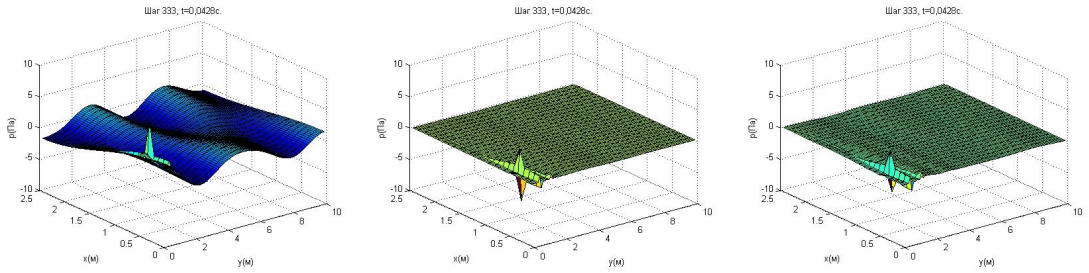
а *б* *в*

Рис. 4. Поверхности звукового давления в момент времени $t^*/4$ для трех вариантов расчетов



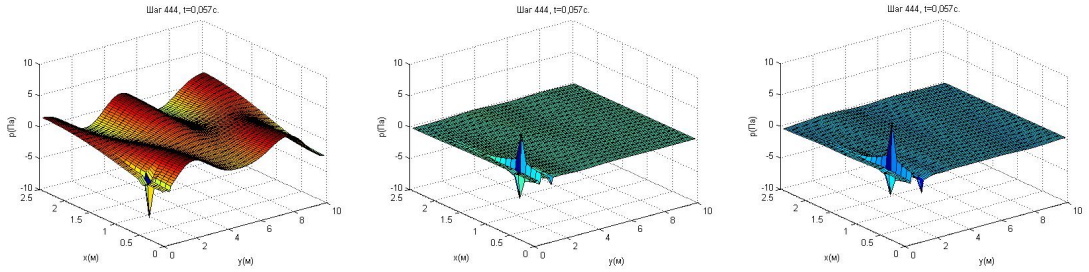
а *б* *в*

Рис. 5. Поверхности звукового давления в момент времени $t^*/2$ для трех вариантов расчетов



а *б* *в*

Рис. 6. Поверхности звукового давления в момент времени $3t^*/4$ для трех вариантов расчетов



а *б* *в*

Рис. 7. Поверхности звукового давления в момент времени t^* для трех вариантов расчетов

Результаты расчетов показывают, что уровень акустического давления в зоне контроля S, достигнутый при прямой минимизации давления с помощью гибридного генетического алгоритма, ниже, чем уровень звукового давления в зоне контроля S для варианта нейроуправления активными источниками. Если оценивать по среднему давлению $p^{\text{ср}}$, снижение звукового давления в зоне контроля S в первом случае в 57 раз, а во втором – в 24 раза.

Следует отметить, что значительно большее снижение давления в контрольной области при прямой минимизации акустического давления по параметрам активных источников достигнуто для конкретного вида изменения давления пассивного источника. Использование же нейросетевого управления хотя и не обеспечивает столь значительных результатов, но при этом дает возможность понизить акустическое давление в контрольной области и для других форм изменения давления в пассивном источнике, а также проводить процесс управления в режиме реального времени.

Итак, результаты вычислительных экспериментов по применению нейросетевого блока управления двух акустических источников, основанного на инверсной модели объекта управления с учетом граничных условий (полное отражение волн от границ области) свидетельствуют о возможности значительного подавления акустического давления в зоне контроля. Примененная схема управления позволяет рассматривать адаптивный процесс управления при изменяющейся форме давления пассивного источника, а также при электронной реализации нейросетевого блока управления проводить управление в режиме реального времени.

Библиографические ссылки

1. Бойко А. И., Тютекин В. В. Плоская активная система гашения звука, основанная на применении двумерных пространственных гармоник // Акустич. журн. 2004. № 1. С. 5–13.

2. Адаптивные системы активного гашения шума и вибраций / А. А. Мальцев, Р. О. Масленников, А. В. Хоряев, В. В. Черепенников // Акустич. журн. 2005. № 2. С. 242–258.

3. Уидроу Б., Макул Д. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения // ТИИЭР. 1975. № 12. С. 69–98.

3. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Мир, 1976.

4. Кошур В. Д., Фадеева М. С. Минимизация звукового давления по параметрам активных источников на основе гибридного генетического алгоритма // Акустич. журн. 2007. Т. 53. № 6. С. 839–842.

5. Сигеру Омату, Мазруки Хамид, Рубия Юсоф. Нейроуправление и его приложения / пер. с англ. Н. В. Батина ; под ред. А. М. Галушкина, В. А. Птичкина. М. : ИПРЖР, 2000.

6. NeuralNetwork. URL: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/neuralnetwork/ (data of visit: 12.03.2011).

7. Кошур М. С., Овсянникова М. С. Компьютерное моделирование распространения и взаимодействия двумерных акустических волн при активных воздействиях на границу прямоугольной области // Вестн. КГТУ. 2006. С. 7–19.

8. Кошур В. Д., Фадеева М. С. Нейроуправление параметрами активного источника для подавления акустических волн в заданной области // Краевые задачи и мат. моделирование. 2008. Т. 1. С. 52–59.

9. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / под общ. ред. В. Г. Потемкина. М. : Диалог-МИФИ, 2002.

V. D. Koshur, M. S. Fadeeva

MANAGEMENT OF ACTIVE ACOUSTIC SOURCES BY MEANS OF A NEURAL NETWORK FOR SUPPRESSION OF ACOUSTIC WAVES IN THE SET AREA

Results of researches on neural management of parameters of active audio sources for pressure decrease in the set part of computation domain are presented. The computing experiments made have shown sufficient efficiency of usage of a neural network management.

Keywords: numerical modeling, active noise control, neural network management.

© Кошур В. Д., Фадеева М. С., 2011

УДК 519.7

А. В. Лапко, В. А. Лапко

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНЫХ СВЕДЕНИЙ О ВИДЕ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Предлагается непараметрическая модель стохастической зависимости, которая обеспечивает учёт априорных сведений о виде восстанавливаемых закономерностей. Исследуются её асимптотические свойства, проводится анализ результатов вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: непараметрическая регрессия, стохастические зависимости, априорные сведения, асимптотические свойства.

Для наиболее полного учёта априорной информации о виде восстанавливаемых зависимостей и экспериментальных данных о её локальном поведении широко используются гибридные модели [1]. Традиционные гибридные модели сочетают в одном решающем правиле преимущество параметрических и непараметрических аппроксимаций. При этом единое решающее правило образуют параметрическая модель восстанавливаемой зависимости и корректирующая её функция непараметрического типа, которые строятся в одном и том же пространстве переменных. Полученные результаты были развиты для условий наличия частичных априорных сведений о виде восстанавливаемых зависимостей в ограниченном пространстве признаков [2]. Основная проблема применения гибридных моделей состоит в выборе вида корректирующей функции, которая является трудно формализуемой. Для её обхода предлагается использовать непараметрическую регрессию, синтез которой основан на обобщении априорной информации о виде восстанавливаемых зависимостей и экспериментальных данных об их локальном поведении.

Цель работы состоит в обосновании возможности учёта априорных сведений о виде восстанавливаемых закономерностей при синтезе непараметрических моделей стохастических зависимостей, основанных на оценках плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена [3].

Синтез модифицированной непараметрической регрессии. Пусть об искомой однозначной зависимости

$$y = \psi(x) \quad \forall \quad x \in R^k \tag{1}$$

известно её описание

$$\bar{y}_1 = F(\bar{x}_1, \alpha) \quad \forall \quad \bar{x}_1 \in R^{k2}, \quad k2 < k$$

относительно некоторого ограниченного набора признаков из $x = (x_1, \bar{x}_1)$, $x_1 = (x_{1v}, v = \overline{1, k1})$, $k = k1 + k2$ и выборка $V = (x_v^i, v = \overline{1, k}, y^i, i = \overline{1, n})$ экспериментальных данных, составленная из статистически независимых значений переменных x, y исследуемой зависимости (1). Параметры α полинома $F(\bar{x}_1, \alpha)$ заданы.

Задача состоит в построении модифицированной непараметрической модели $\bar{\bar{y}}(x)$ зависимости (1), совмещающей в одном решающем правиле всю имеющуюся априорную информацию.

На основании исходных экспериментальных данных сформируем промежуточную обучающую выборку

$$V^1 = (x_1^i, \bar{y}_1^i = F(\bar{x}_1^i, \alpha), y^i, i = \overline{1, n}).$$

Принимая в качестве оптимального решающего правила, в смысле минимума среднеквадратического отклонения, условное математическое ожидание $\varphi(x)$ [4], построим непараметрическую регрессию

$$\bar{\bar{y}}(x) = \sum_{i=1}^{n} y^i \beta_i(x), \tag{2}$$

где

$$\beta_i(x) = \frac{\prod_{v=1}^{k1} \Phi\left(\frac{x_{1v} - x_{1v}^i}{c_v}\right) \Phi\left(\frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_1^i}{c}\right)}{\sum_{i=1}^{n} \prod_{v=1}^{k1} \Phi\left(\frac{x_{1v} - x_{1v}^i}{c_v}\right) \Phi\left(\frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_1^i}{c}\right)}.$$

В статистике (2) ядерные функции $\Phi(u)$ удовлетворяют условиям H:

$$\Phi(u) = \Phi(-u), \ 0 \le \Phi(u) < \infty,$$
$$\int \Phi(u)\, du = 1, \ \int u^2 \Phi(u)\, du = 1,$$
$$\int u^m \Phi(u)\, du < \infty, \ 0 \le m < \infty;$$

$c = c(n)$, $c_v = c_v(n)$, $v = \overline{1, k1}$ – коэффициенты размытости ядерных функций, значения которых убывают с ростом объёма n обучающей выборки. Здесь и далее бесконечные пределы интегрирования опускаются.

При оценивании зависимости в ситуациях $x = (x_1, \bar{x}_1)$ сначала вычисляется $\bar{y}_1 = F(\bar{x}_1, \alpha)$, а затем по данным $(x_1, \bar{y}_1)$ в соответствии со статистикой (2) определяется значение $\bar{\bar{y}}(x)$.

Оптимизация модифицированной непараметрической регрессии (2) по коэффициентам размытости

ядерных функций c, c_v, $v=\overline{1,k1}$ осуществляется в режиме «скользящего экзамена» из условия минимума статистической оценки среднеквадратической ошибки аппроксимации искомой зависимости.

Асимптотические свойства непараметрической регрессии. Без существенной потери общности будем считать, что в частичном наборе признаков x_{1v}, $v=\overline{1,k1}$ их количество $k1 = 1$. В качестве ядерной функции примем функцию вида

$$\Phi(u)=\begin{cases}\frac{1}{2} & \forall \quad |u|<1\\ 0 & \forall \quad |u|\ge 1.\end{cases}$$

В этом случае непараметрическая регрессия (2) запишется как

$$\overline{\overline{y}}(x)=\frac{\sum_{i=1}^{n} y^i \Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\Phi\left(\frac{\overline{y}_1-\overline{y}_1^i}{c}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\Phi\left(\frac{\overline{y}_1-\overline{y}_1^i}{c}\right)}. \qquad (3)$$

Тогда справедливо следующее утверждение.

Теорема. Пусть 1) частичные сведения $\overline{y}_1=F(\overline{x}_1,\alpha)$ восстанавливаемой зависимости (1) принадлежат к классу линейных полиномов; 2) функция $y=\varphi(x)$ и плотности вероятностей $p(x)$, $p(x,y_1)$ ограничены вместе со своими производными до второго порядка включительно; 3) ядерные функции $\Phi(u)$ являются положительными, симметричными и нормированными; 4) последовательности коэффициентов размытости $c_1(n)$, $c(n)$ ядерных функций таковы, что при $n\to\infty$ их значения стремятся к нулю. Тогда непараметрическая регрессия (3) обладает свойством асимптотической несмещённости.

Доказательство. Представим модель (3) в виде

$$\overline{\overline{y}}(x)=\frac{(nc_1c)^{-1}\sum_{i=1}^{n} y^i \Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\Phi\left(\frac{\overline{y}_1-\overline{y}_1^i}{c}\right)}{(nc_1c)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\Phi\left(\frac{\overline{y}_1-\overline{y}_1^i}{c}\right)}=\frac{\overline{z}_1(x)}{\overline{z}_2(x)}. \qquad (4)$$

Проведем преобразования

$$M\frac{\overline{z}_1(x)}{\overline{z}_2(x)}= \\ =M\left[\frac{\overline{z}_1(x)}{M\,\overline{z}_2(x)}+\frac{\overline{z}_1(x)}{\overline{z}_2(x)\,M\,\overline{z}_2(x)}\left(M\,\overline{z}_2(x)-\overline{z}_2(x)\right)\right], \qquad (5)$$

где M – знак математического ожидания.

Ввиду ограниченности значений $\overline{\overline{y}}(x)=\frac{\overline{z}_1(x)}{\overline{z}_2(x)}$ свойства статистики (3) зависят от асимптотического поведения $M(\overline{z}_1(x))$, $M(\overline{z}_2(x))$. Вычислим

$$M\left(\overline{z}_2(x)\right)=(nc_1c)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\int\ldots\int\Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\times \\ \times\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}\alpha_v\frac{\overline{x}_{1v}-\overline{x}_{1v}^i}{c}\right)p\left(x_1^i,\overline{x}_{1v}^i,v=\overline{1,k2}\right)dx_1^i d\overline{x}_{1v}^i\ldots d\overline{x}_{1k2}^i.$$

Так как $x_1^i,\overline{x}_{1v}^i,v=\overline{1,k2}$ являются значениями одних и тех же случайных величин $t,t_v,v=\overline{1,k2}$ с плотностью вероятности $p\left(t,t_v,v=\overline{1,k2}\right)$, то

$$M\left(\overline{z}_2(x)\right)=(c_1c)^{-1}\int\ldots\int\Phi\left(\frac{x_1-t}{c_1}\right)\times \\ \times\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}\frac{\alpha_v}{c}\left(\overline{x}_{1v}-t_v\right)\right)p\left(t,t_v,v=\overline{1,k2}\right)dtdt_1\ldots dt_{k2}.$$

Проведём замену переменных $u=\frac{(x_1-t)}{c_1}$, $u_v=\frac{\alpha_v\left(\overline{x}_{1v}-t_v\right)}{c}$. После несложных преобразований получим

$$M\left(\overline{z}_2(x)\right)=\frac{c^{k2-1}}{\prod_{v=1}^{k2}\alpha_v}\int\ldots\int\Phi(u)\,\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}u_v\right)\times \\ \times p\left(x_1-c_1u,\overline{x}_{1v}-\frac{c}{\alpha_v}u_v,v=\overline{1,k2}\right)du\,du_1\ldots\,du_{k2}. \qquad (6)$$

Разложим функцию

$$p\left(x_1-c_1u,\overline{x}_{1v}-\frac{c}{\alpha_v}u_v,v=\overline{1,k2}\right)$$

в ряд Тейлора в точке $x=\left(x_1,x_{1v},v=\overline{1,k2}\right)$ и преобразуем (6) с учётом свойств:

$$\frac{1}{2^{k2-1}}\int_{-1}^{1}\ldots\int_{-1}^{1}\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}u_v\right)du_1\ldots du_{k2}=1,$$

$$\frac{1}{2^{k2-1}}\int_{-1}^{1}\ldots\int_{-1}^{1}u_t\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}u_v\right)du_1\ldots du_{k2}=0,\ t=\overline{1,k2},$$

$$\frac{1}{2^{k2-1}}\int_{-1}^{1}\ldots\int_{-1}^{1}u_t^2\,\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}u_v\right)du_1\ldots du_{k2}=\beta^2.$$

В результате при $n\to\infty$ имеем

$$M\left(\overline{z}_2(x)\right)\sim\frac{2^{k2-1}c^{k2-1}}{\prod_{v=1}^{k2}\alpha_v}\times \\ \times\left[p(x)+\frac{c_1^2}{2}p_{x_1}^{(2)}(x)+\frac{c^2\beta^2}{2^{k2}}\sum_{v=1}^{k2}\frac{1}{\alpha_v^2}p_v^{(2)}(x)+0\left(c^4\right)\right], \qquad (7)$$

где $p_{x_1}^{(2)}(x)$, $p_v^{(2)}(x)$ – вторые производные плотности вероятности $p\left(x_1,\overline{x}_{1v},\nu=\overline{1,k2}\right)$ по переменным x_1, $\overline{x}_{1v},v=\overline{1,k2}$ соответственно.

Следуя приведённой технологии вычислений, найдём асимптотическое выражение для

$$M\left(\overline{\overline{z}}_1(x)\right)=\left(nc_1c\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\int\ldots\int y^i\Phi\left(\frac{x_1-x_1^i}{c_1}\right)\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}\alpha_v\frac{\overline{x}_{1v}-\overline{x}_{1v}^i}{c}\right)\times$$

$$\times p\left(y^i,x_1^i,\overline{x}_{1v}^i,v=\overline{1,k2}\right)dy^i\,dx_1^i\,d\overline{x}_{11}^i\ldots d\overline{x}_{1k2}=$$

$$=\frac{c^{k2-1}}{\prod_{v=1}^{k2}\alpha_v}\int\ldots\int\varphi\left(x_1-c_1u,\overline{x}_{1v}-\frac{c}{\alpha_v}u_v,v=\overline{1,k2}\right)\times$$

$$\times\Phi(u)\,\Phi\left(\sum_{v=1}^{k2}u_v\right)p\left(x_1-c_1u,\overline{x}_{1v}-\frac{c}{\alpha_v}u_v,v=\overline{1,k2}\right)du\,du_1\ldots du_{k2}\sim$$

$$\sim\frac{2^{k2-1}\,c^{k2-1}}{\prod_{v=1}^{k2}\alpha_v}\left[\varphi(x)\,p(x)+\frac{c_1^2}{2}\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_1}^{(2)}+\right.$$

$$\left.+\frac{c^2\beta^2}{2^{k2}}\sum_{v=1}^{k2}\frac{1}{\alpha_v^2}\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_{1v}}^{(2)}+0\left(c_1^2c^2,c_1^4c_v^4,v=\overline{1,k2}\right)\right]. \quad (8)$$

В выражении (8) $\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_1}^{(2)}$, $\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_{1v}}^{(2)}$ – вторые производные произведения двух функций по переменным x_1, $\overline{x}_{1v}, v=\overline{1,k2}$ соответственно.

Подставим выражения (7) и (8) в (5), получим

$$M\left(\overline{\overline{y}}(x)\right)\sim M\frac{\overline{\overline{z}}_1(x)}{\overline{\overline{z}}_2(x)}\sim$$

$$\sim\frac{\varphi(x)\,p(x)+\frac{c_1^2}{2}\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_1}^{(2)}+\frac{c^2\beta^2}{2^{k2}}\sum_{v=1}^{k2}\frac{1}{\alpha_v^2}\left(\varphi(x)\,p(x)\right)_{x_{1v}}^{(2)}}{p(x)+\frac{c_1^2}{2}p_{x_1}^{(2)}(x)+\frac{c^2\beta^2}{2^{k2}}\sum_{v=1}^{k2}\frac{1}{\alpha_v^2}p_v^{(2)}(x)}. \quad (9)$$

Из анализа выражения (9) следует, что при $c_1=c_1(n)\to 0$, $c=c(n)\to 0$ с ростом $n\to\infty$ изучаемая статистика (3) обладает свойством асимптотической несмещённости.

Замечания. При $k2=2$ полученные результаты могут быть использованы при исследовании свойств статистических моделей, основанных на методе группового учёта аргументов [5]. Идея метода заключается в построении последовательности моделей

$$\overline{y}_j=\overline{\varphi}_j(x_j,\overline{y}_{j-1}),i=\overline{1,m}. \quad (10)$$

Ранее не используемая в моделях $\overline{y}_t$, $t=\overline{1,j-1}$ компонента x_j вектора аргументов x обеспечивает в наборе с $\overline{y}_{j-1}$ минимальное расхождение значений $\overline{y}_j$ с экспериментальными данными. На каждом этапе процедуры (10) искомая зависимость оценивается в пространстве двух переменных $(x_j,\overline{y}_{j-1})$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов. На основании данных вычислительных экспериментов сравнивалась эффективность статистики (2) и традиционной непараметрической регрессии

$$\tilde{y}(x)=\frac{\sum_{i=1}^{n}y^i\prod_{v=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_v-x_v^i}{c_v}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\prod_{v=1}^{k}\Phi\left(\frac{x_v-x_v^i}{c_v}\right)}. \quad (11)$$

В качестве искомой зависимости (1) использовался полином второй степени

$$\psi(x)=x_1^2+2x_2^2+x_1x_2+x_3+0,5x_4+2x_5, \quad (12)$$

каждый аргумент которого принимает значения из интервала $x_v\in[0;1]$, $v=\overline{1,5}$ с равномерным законом распределения. Частичные сведения о восстанавливаемой зависимости в соответствии с условиями теоремы определяются линейным полиномом

$$\overline{y}_1=x_3+0,5x_4+2x_5.$$

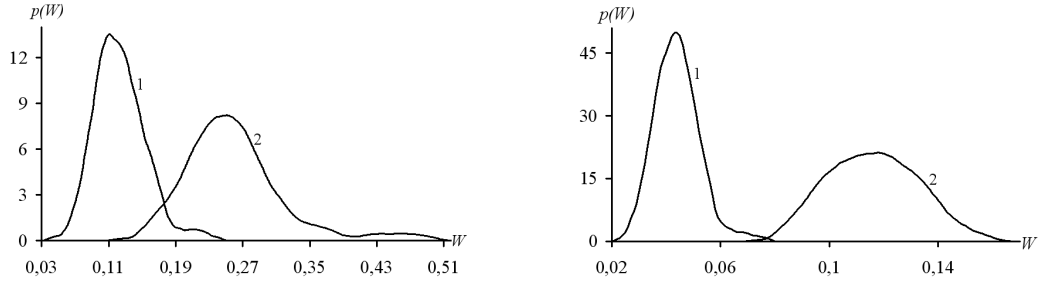
При формировании обучающей выборки $V=\left(x_v^i,v=\overline{1,5},y^i,i=\overline{1,n}\right)$ на значения функции (12) накладывалась аддитивная помеха

$$y^i=\psi\left(x^i\right)\left(1+2\left(\varepsilon^i-0,5\right)r\right), \quad (13)$$

где ε – случайная величина с равномерным законом в диапазоне $[0;1]$; r – параметр, определяющий уровень шума.

При синтезе непараметрических моделей (2), (11) использовалась ядерная функция Епанечникова, а их оптимизация по коэффициентам размытости осуществлялась в режиме «скользящего экзамена» из условия минимума среднеквадратического критерия. При этом полагалось, что значения коэффициентов размытости $c_v=c$, $v=\overline{1,5}$ для непараметрической регрессии и $\overline{c}_v=\overline{c}$, $v=1,2$ – для модели (2), так как интервалы изменения аргументов восстанавливаемой зависимости априори одинаковые. В качестве критерия эффективности моделей (2), (11) принимались среднеквадратические отклонения W_2, W_{11} их значений от функции (12), которые оценивались по контрольной выборке V_k объёма $n_k=10\,000$. При этом ситуации из выборки V_k, в которых исследуемые непараметрические модели не идентифицируют значения функции (12), не участвуют в формировании критериев их эффективности. Доля таких ситуаций не превышает значений 0,06 от объёма контрольной выборки.

Вычислительные эксперименты при фиксированных условиях исследования осуществлялись 60 раз. По полученным результатам восстанавливались плотности вероятности $p(W_2)$, $p(W_{11})$ оценок среднеквадратических отклонений W_2, W_{11} соответственно моделей (2), (11) (см. рисунок).



а *б*

Оценки плотностей вероятностей $p(W_2)$, $p(W_{11})$ среднеквадратических отклонений модифицированной непараметрической модели $\bar{\bar{y}}$ (кривая 1) и непараметрической регрессии $\tilde{y}$ (кривая 2). Условия эксперимента: объём обучающей выборки $n = 50$ (*а*), $n = 200$ (*б*); уровень шума в процедуре (13) $r = 0{,}1$

Анализ данных вычислительных экспериментов показывает, что статистические оценки законов распределения значений критериев эффективности W_2, W_{11} достоверно отличаются при различных объёмах обучающих выборок, причём интервалы изменения среднеквадратического критерия W_{11} непараметрической регрессии (11) характеризуются большими их значениями по сравнению с модифицированной регрессией (2). С ростом объёма обучающей выборки преимущество моделей (2) возрастает. Например, отношение $R = \bar{W}_{11}/\bar{W}_2$ средних значений W_2, W_{11} соответствует 2, 3 при $n = 50$ и 3 при $n = 200$.

Эффективность модифицированной непараметрической модели (2) объясняется возможностью снижения её размерности за счёт использования априорных сведений о наличии линейной взаимосвязи между переменными исследуемой зависимости. Данное заключение согласуется с результатами исследования гибридных моделей стохастических зависимостей [1].

Традиционная непараметрическая регрессия, основанная на оценке плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена, обобщена при построении статистических моделей в условиях наличия частичных сведений о виде восстанавливаемых зависимостей. Предлагаемая модифицированная непараметрическая регрессия обладает свойством асимптотической несмещённости. Это позволяет аналитически обосновать возможность частичного сжатия пространства признаков на основе линейных преобразований без существенной потери полезной информации.

Перспективное направление дальнейших исследований состоит в развитии предлагаемого подхода на анализ свойств статистических моделей, основанных на методе группового учёта аргументов.

Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Гибридные модели стохастических зависимостей // Автометрия. 2002. № 5. С. 38–48.

2. Лапко В. А. Синтез и анализ гибридных моделей стохастических зависимостей в условиях наличия их частного описания // Автометрия. 2004. № 1. С. 51–59.

3. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Statistic. 1962. Vol. 33. P. 1065–1076.

4. Надарая Э. А. Непараметрические оценки кривой регрессии // Тр. ВЦ АН ГССР. 1965. Вып. 5. С. 56–68.

5. Ивахненко А. Г. Непараметрический комбинированный алгоритм МГУА на операторах поиска аналогов // Автоматика. 1990. № 5. С. 14–27.

A. V. Lapko, V. A. Lapko

NONPARAMETRIC REGRESSION IN THE CONDITIONS OF PARTIAL DATA ON A MODE OF RESTORED LEGITIMACIES

The nonparametric model of stochastic dependence which provides for registration of a priori data on a mode of restored legitimacies is offered. Its asymptotic properties are researched.

Keywords: nonparametric regression, stochastic dependences, a priori data, asymptotic properties.

© Лапко А. В., Лапко В. А., 2011

УДК: 538.911, 539.21

В. М. Ленченко, Ю. Ю. Логинов, А. В. Мозжерин

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ И РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ФОТОТОКА В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Эффективность фотопреобразования света в электрический ток ограничена рекомбинационными, тепловыми и другими потерями энергии в структурах солнечных элементов (СЭ), используемых, в том числе, в космических аппаратах (КА). Уравнения, описывающие потери, уточнены с учетом рассредоточения омических потерь в лицевом слое (ЛС). Впервые проведена оценка тепловых потерь, обусловленных эффектом Пельтье, в контактах электрической цепи СЭ. Обсуждаются также способы минимизации рекомбинационных потерь в ЛС за счет электрического поля контактных зарядов.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотоны, рекомбинация, фототок.

В настоящее время наиболее хорошо отработана технология СЭ на базе *p*-Si с n^+ лицевым слоем. Производство СЭ поставлено на промышленную основу, что обеспечивает им конкурентоспособность по сравнению с СЭ на гетероструктурах. Эффективность преобразования света в электричество у таких СЭ не превышает 20 % при теоретическом пределе около 30 %.

Если эффективность базовой области СЭ достигла своего технологического предела: здесь минимизированы рекомбинационные потери, в том числе на поверхности тыльного контакта за счет изготовления его в виде изотипного p^+–p^--перехода, то относительно лицевого n^+-слоя пока не предложено однозначных методов минимизации рекомбинационных и тепловых потерь фототока.

Обсудим эту проблему, считая, что именно за счет повышения параметров лицевого слоя можно увеличить КПД СЭ в целом на несколько процентов.

Уравнения баланса. Для расчета вольт-амперной характеристики (ВАХ) СЭ используем следующие уравнения переноса носителей тока:

$$-\frac{\partial j_n}{\partial x} = g_n(x) - \frac{\Delta n}{\tau_n}, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial j_p}{\partial x} = g_p(x) - \frac{\Delta p}{\tau_p}, \qquad (2)$$

где j_n и j_p – потоки электронов и дырок; Δn и Δp, g_n и g_p, τ_n и τ_p – их неравновесные концентрации, скорости генерации и времена жизни носителей тока, соответственно.

Эти же уравнения могут быть представлены также и в интегральной форме:

$$J_n = G_n - R_n - J_{ns}, \qquad J_p = G_p - R_p - J_{ps}, \qquad (3)$$

где J_n и J_p – потоки электронов и дырок через p–n^+-переход; J_{ns} и J_{ps} – их рекомбинационные потоки на внешней поверхности СЭ (электронов – на тыльный контакт, дырок – на лицевую поверхность); G_n и G_p, R_n и R_p – скорости генерации и рекомбинации электронов в *p*-базе, дырок – в лицевом n^+-слое.

Аналогичные уравнения могут быть записаны и для баланса энергии фотона в структурах СЭ.

Представим его в виде

$$W = Q_a + Q_T + Q_R + Q_{np} + Q_p + J(V + V_k). \qquad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения.

Общий поток энергии излучения в СЭ:

$$W = \sum_{h\nu>0} h\nu G_\nu . \qquad (5)$$

Поток энергии нефотоактивной части излучения:

$$Q_a = \sum_{h\nu<\varepsilon_g} h\nu G_\nu . \qquad (6)$$

Эта часть излучения поглощается в структурах СЭ за счет излучения фотонов, также на тыльных электродах и примесных атомах (ε_g – ширина запрещенной зоны).

Кинетическая энергия фоточастиц, термолизация которых приводит к нагреву материала СЭ (Q_T – энергия термолизации):

$$Q_T = \sum_{h\nu>\varepsilon_g} (h\nu - \varepsilon_g) G_\nu . \qquad (7)$$

Энергия, выделяемая при рекомбинации неравновесных носителей заряда (ННЗ):

$$Q_R = R \cdot \varepsilon_g . \qquad (8)$$

Энергия, выделяемая в p–n-переходе:

$$Q_{np} = JqV_{np}, \qquad (9)$$

где V_{np} – высота p–n-перехода в рабочем режиме (рис. 1, 2).

Омические потери в n^+-канале:

$$Q_p = \int_{v}^{\varphi_0} J(\varphi) d\varphi , \qquad (10)$$

где $J(\varphi)$ – фототок, $d\varphi = \varphi_0 - v$ – падение напряжение в канале освещаемой площадки СЭ до собирающего электрода.

Кроме того, в (4) V – выходное напряжение; V_k – контактная разность потенциалов полупроводник–электроды.

Замечая, что согласно (3),

$$R = G - J,\ R = R_n + R_p, \qquad J = J_n + J_p + J_{ps}, \quad G = G_n + G_p, \qquad (11)$$

из уравнений (4)–(8) находим

$$J\varepsilon_g = Q_{np} + Q_p + J(V + V_k)q . \qquad (12)$$

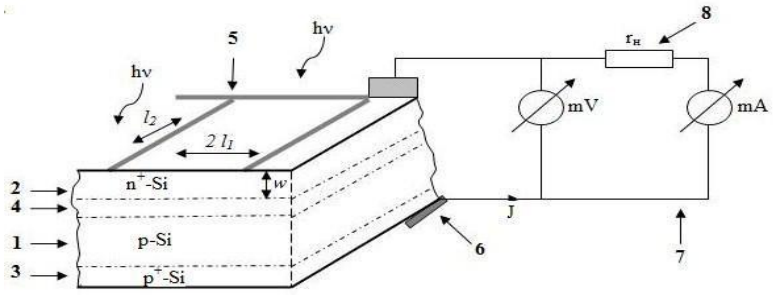


Рис. 1. Фрагмент структуры СЭ, схема измерений ВАХ:
1 – базовая *p*-область СЭ; *2* – высоколегированный тонкий слой n^+-Si; *3* – высоколегированный слой p^+-Si; *4* – *p*–n^+-переход; *5* – собирающий электрод; *6* – металлизация тыльного электрода; *7* – электрическая цепь измерения; *8* – нагрузочное сопротивление $r_н$

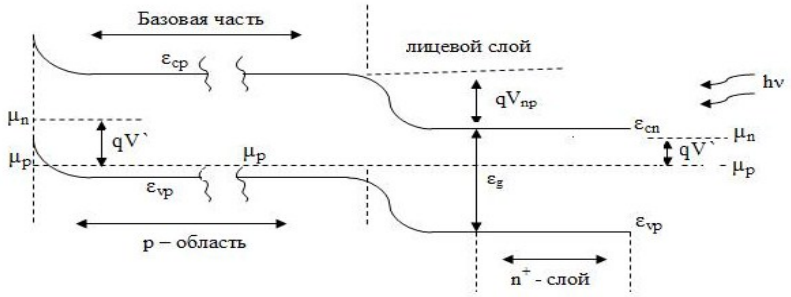


Рис. 2. Зонная структура СЭ в рабочем режиме:
μ_n и μ_p – уровни Ферми в n^+- и *p*-областях; $qv = \mu_n - \mu_p$; $\varepsilon_{cn} - \varepsilon_{vn} = \varepsilon_{cp} - \varepsilon_{vp} = \varepsilon_g$, $\varepsilon_{cn} - \mu_n + \mu_p - \varepsilon_{vp} = qV_k$; $\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{cn} = qV_{np}$; V' – падение напряжения во внешней цепи с учетом омических потерь в n^+-слое

В режиме холостого хода, когда $J = 0$ и $V = V_{xx}$, имеем $Q_p = 0$ и $Q_{np} = JV_{np}^0 q$ и, следовательно,

$$\varepsilon_g = q\left(V_{np}^0 + V_k\right), \tag{13}$$

где qV_{np}^0 – высота *p*–n^+-перехода СЭ в термодинамическом равновесии, определяемая уравнением [1]

$$qV_{np}^0 = kT \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}, \tag{14}$$

где q – элементарный заряд; N_a, N_d, n_i – концентрации соответственных акцепторов в базовой области и доноров в ЛС.

Независимо от того, является ли контакт омическим или нелинейным, при прохождении тока на нем выделяется тепловая энергия, известная как теплота Пельтье:

$$Q_{\Pi} = \Pi J. \tag{15}$$

Здесь коэффициент Пельтье (П) может быть оценен по формуле [2] для *n*-полупроводника:

$$\Pi_n = \frac{kT}{q}\left(\sigma + \frac{5}{2} + \ln \frac{z_n}{n}\right) \tag{16}$$

и подобной формулой для *p*-полупроводника с заменой «*n*» на «*p*» и z_n на z_p, где z_n, z_p – плотности состояний электронов и дырок, σ – показатель степени свободного пробега – энергия в тепловых столкновениях носителей тока, $\sigma = -\frac{1}{2}$ для кремния.

Формула (16) справедлива для невырожденного полупроводника. В нашем случае – для базовой области, в которой концентрация дырок $p \approx 10^{16}$ см$^{-3}$ и

$$\Pi_p = \frac{kT}{q}\left(2 + \ln \frac{z_p}{p}\right), \tag{17}$$

где $z_p \approx 10^{19}$ см$^{-3}$ – плотность состояния дырок в кремнии. Получаем $\Pi_p \approx 0{,}23$ В.

Что касается ЛС, то здесь концентрация электронов достигает $10^{20}\ldots10^{21}$ см$^{-3}$ и, следовательно, полупроводник вырожден. Коэффициент Пельтье вырожденного полупроводника отрицателен и мал ($\Pi < kT/q \approx 0{,}026$ В). Тепло выделяется на контактах базы: на тыльном и на границе с *p*–n^+-переходом. Это проявляется в потере напряжения в цепи СЭ порядка $\Pi \approx 0{,}23$ В, что существенно.

Влияние рассредоточенности омических потерь в ЛС на ВАХ СЭ и потери мощности фототока в их структурах. Фототок $J(\varphi)$ в лицевом слое (ЛС) СЭ возрастает, а напряжение φ падает от середины ЛС. Когда $J = 0$, а $\varphi = \varphi_0$, по направлению к электродам,

где $\varphi = V$, это описывается дифференциальными уравнениями [3–5]

$$\frac{\partial J(\varphi)}{\partial x} = l_2 j_{np}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\rho}{l_2 w} J(\varphi), \tag{18}$$

где $0 \le x \le l_1$, l_1 – протяженность собирающего канала (n^+-канала ЛС); ρ – его удельное сопротивление; w – эффективная толщина; l_2 – протяженность собирающего электрода.

Плотность фототока через p–n-переход здесь обозначена j_{np} и определяется формулой

$$j_{np} = j_v - j_0(e^{\frac{q\varphi}{kT}} - 1). \tag{19}$$

Ниже

$$J_{np} = j_{np} l_1 l_2, \; J_v = j_v l_1 l_2, \; J_0 = j_0 l_1 l_2,$$

где l_1, l_2 – освещаемая площадь СЭ; j_v и j_0 – плотности фото- и обратного темнового токов через p–n^+-переход.

Как показано в [5], интегрирование уравнений (18) приводит к следующему выражению для фототока в ЛС:

$$\frac{rJ^2}{2} = \Phi(\varphi_0) - \Phi(V); \tag{20}$$

где $r = \frac{\rho l_1}{w l_2}$ – омическое сопротивление участка, $0 \le x \le l_1$ – лицевого слоя, а

$$\Phi(\varphi) = (J_v + J_0)\varphi - \frac{kT}{q} J_0 (e^{\frac{q\varphi}{kT}} - 1). \tag{21}$$

Омические потери в n^+-канале следует вычислять по формуле

$$Q_\rho = \int_V^{\varphi_0} J(\varphi) d\varphi, \tag{22}$$

в которой так же, как и в (21), потенциал φ_0 должен быть определен независимым путем. В частности, из второго уравнения (18) находим

$$\varphi_0 - V = \Delta V_\rho = \int_0^{l_1} J(x) \frac{\rho dx}{l_2 w}, \tag{23}$$

где l_1, l_2 – геометрические параметры n^+-канала: ρ – удельное сопротивление, $J(x)$ – фототок в канале на расстоянии x от середины освещаемой площадки СЭ по направлению к электроду.

В приближении малых омических потерь следует:

$$Q_\rho \approx \frac{J^2 r}{2} \text{ и } \Delta V_\rho = \frac{1}{2} J(V) r. \tag{24}$$

Значения для ΔV_ρ, полученные в [3]:

$$\Delta V_\rho = \frac{1}{3} J \cdot r, \; J \equiv J(V). \tag{25}$$

С учетом того, что собирающие электроды СЭ имеют П-образный вид, выражения (24) и (25) обобщаются: $\Delta V_\rho \approx \beta J r$, где β – эмпирический параметр ($0{,}33 \le \beta \le 0{,}5$). В этом приближении $\varphi_0 = V + \Delta V_\rho$ и уравнение (20) приводится к виду

$$J = 2\beta(J_v + J_0) - J_0 e^{\frac{qv}{kT}} F(\alpha), \tag{26}$$

где $\alpha = \frac{kT}{q V_\rho}$, $F(\alpha) \approx \frac{e^\alpha - 1}{\alpha}$.

В [3; 4; 6] уравнение (26) отличается от нашего тем, что в нем $2\beta = 1$ и $F(\alpha) \sim e^\alpha$.

Тепловые потери фототока непосредственно в p–n^+-переходе определяются по формуле

$$Q_{np} = \int_0^{l_1} \left(V_{np}^0 - \varphi\right) J_{np}(\varphi) l_2 dx = \int_V^{V+\Delta V_\rho} \frac{J_{np}(\varphi)}{J(\varphi)} \frac{d\varphi}{r}. \tag{27}$$

В приближении $\Delta V_\rho << V$ оценки Q_{np} можно производить по более простой формуле

$$Q_{np} \approx \frac{1}{2} J_{np}(V_{np}^0 - V). \tag{28}$$

Что касается рекомбинационных потерь Q_{Rn} в базовой области и Q_{Rp} – в ЛС, то их можно определить по формуле (8):

$$Q_{Rn} = \varepsilon_g R_n = \varepsilon_g (G_n - J_n), \; Q_{Rp} = \varepsilon_g (G_p - J_p) \tag{29}$$

или из уравнений

$$Q_{Rn} = \frac{1}{\tau_n} \Delta N = \frac{1}{\tau_n} \int_{x_n}^{l_n + x_n} \Delta n(x) dx, \quad Q_{Rp} = \frac{1}{\tau_p} \Delta P = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{x_n} \Delta p(x) dx. \tag{30}$$

Здесь $\Delta n(x)$ и $\Delta p(x)$ должны быть решениями уравнений (1) и (2) при соответствующих граничных условиях:

$$J_n(x_n + l_n) = 0, J_n(x_n) = J_{nv}, \tag{31}$$

$$J_p(x_n) = J_{pv}, J_p(0) = J_{ps}, \tag{32}$$

записанных с учетом того, что поток электронов через тыльный контакт практически отсутствует (контакт с изотипным p–p^+-переходом), а в ЛС – поток J_{ps} определяется поверхностной рекомбинацией. В приближении $J_{ns} = 0$ и $l_n > L_n$ решение уравнения (18) известно [7]:

$$j_{nv} = \frac{q g_0 \alpha_v L_n}{(\alpha_v L_n + 1)} e^{-\alpha L_n} (1 + f), \quad f = \frac{e^{-\frac{l_n}{L_n}} - \alpha_v L_n e^{-\alpha_v l_n}}{ch\left(\frac{l_n}{L_n}\right)}. \tag{33}$$

При $\alpha_v l_n >> 1$, $f << 1$

$$G_n = q g_0 e^{-\alpha_v x_n} (1 - e^{-\frac{l_n}{L_n}}). \tag{34}$$

Эти выражения совместно с уравнением (29), в котором $J_n = J_{nv} + J_{0n} + J_{0n}e^{\frac{qV}{kT}}F(\alpha)$, решают проблему оценок Q_{Rn}. Что касается потерь $Q_{Rp} = G_p - J_p$, то для их оценок необходимо учесть особенности ЛС: наличие в нем тянущего поля и рекомбинации дырок на внешней поверхности ЛС. Ниже мы анализируем J_p, R_s с учетом этих факторов.

Эффект сильного поля в лицевом слое СЭ: влияние его на R-потери и эффективность фотопреобразования ЛС. Тянущее поле в ЛС создается как градиентом доноров:

$$E = -\frac{kT}{q}\frac{\partial}{\partial x}\ln N_d(x), \qquad (35)$$

так и внешним источником – контактными зарядами на ПС и в диэлектрике (E_e).

Поток дырок j_p имеет две составляющие:

$$j_p = qp\mu_p E - q\frac{\partial}{\partial x}(D_p p). \qquad (36)$$

Первый член – это дрейфовый поток, второй – диффузионный.

Условием сильного поля в ЛС может служить неравенство

$$\Delta t_E << \Delta t_D, \qquad (37)$$

где Δt_E – дрейфовое время пролета дырок ЛС; $\Delta t_E = \frac{l_p}{\mu_p E}$, где l_p – толщина ЛС; $\mu_p = \frac{q}{kT}D_p$ – подвижность дырок в ЛС; $\Delta t_D = \frac{l_p^2}{2D_p}$ – диффузионное время пролета расстояния l_p.

Из (37) следует

$$E >> \frac{2D_p}{\mu_p l_p}. \qquad (38)$$

Замечая, что $D_p/\mu_p \approx 2{,}5\cdot10^{-2}$ эВ и учитывая, что l_p в СЭ n^+–p-Si типов $l_p \le 5\cdot10^{-5}$ см, получаем $E >> 10^3$ В/см. Непосредственно в p–n^+-переходе $E \ge 10^5$ В/см, а в узком лицевом слое поле на порядок меньше, но условие (38) выполняется. Это означает, что в ЛС перенос дырок осуществляется под действием тянущего поля и поэтому

$$j_p = qp\mu_p E. \qquad (39)$$

При этом уравнение (2) с учетом того, что

$$g_p(x) = g_0 e^{-\alpha_v x}, \qquad (40)$$

где α_v – коэффициент поглощения света, переписывается в виде

$$v_p\frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} + \frac{\Delta p}{\tau_p} = g_0 e^{-\alpha_v x} \qquad (41)$$

$$(v_p = \mu_p E,\ \lambda_p = \mu_p E\tau_p).$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$\Delta p = -\frac{g_0\tau_p}{\alpha\lambda - 1}e^{-\alpha_v x} + Be^{-\frac{x}{\lambda_p}}. \qquad (42)$$

Из граничного условия

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} = 0 \ \text{ при } x = l_p$$

находим:

$$B = \frac{g_0\tau}{\alpha_v\lambda - 1}e^{-\alpha_v l_p}e^{\frac{l_p}{\lambda_p}} \qquad (43)$$

и

$$\Delta p(0) = \frac{g\tau}{\alpha_v\lambda - 1}(1 - e^{-(\alpha_v - \frac{1}{\lambda_p})l_p}). \qquad (44)$$

Поток дырок в *p*–*n*-переходе можем определить с помощью уравнения (2) в интегральной форме:

$$j_p(l_p) - j_{ps}(0) + \frac{1}{\tau_p}\Delta\Phi_p = \frac{g_0}{\alpha_v}(1 - e^{-\alpha_v l_p}). \qquad (45)$$

Здесь

$$\Delta\Phi = \int_0^{l_p}\Delta p(x)dx \approx \frac{g_0\tau_p\lambda_p}{\alpha_v\lambda - 1}\left[e^{-\alpha^* l_p}(1 - e^{\frac{l_p}{\lambda_p}}) - \frac{1 - e^{-\alpha_v l_p}}{\alpha_v\lambda}\right]. \qquad (46)$$

В результате из (45), (44) и (46) находим

$$j_p(l_p) = j_{ps}(0) + \frac{g\lambda}{\alpha_v\lambda - 1}\left(1 - e^{-\alpha^* l_p}\right),$$

$$\alpha^* = \alpha_v - \frac{1}{\lambda_p}. \qquad (47)$$

Уравнение (44) приводит к следующему выражению для $j_{ps}(0)$:

$$j_{ps} = -\frac{g\tau}{(\alpha\lambda - 1)}N_s\alpha_p^0\left(1 - e^{-\alpha_p^* l_p}\right). \qquad (48)$$

Из (47) и (48) находим следующее отношение потоков дырок из ЛС на ПС и в n^+–*p*-переход:

$$\chi = \frac{j_p(l_p)}{j_{ps}(0)} = 1 + \frac{v_p\beta_s}{\alpha^0{}_p N_s}. \qquad (49)$$

Условиями малости рекомбинационных потерь является $\chi >> 1$ или

$$v_p = \mu_p E >> \alpha_p^0 N_s\beta_s^{-1}. \qquad (50)$$

Обычно $N_s \approx 10^{12}\ldots10^{13}$ см$^{-2}$, $\alpha_p^0 \sim 10^{-9}\ldots10^{-8}$ см^3/с и $\beta_s^{-1} << 1$, поэтому $\mu_p E >> 10^3\ldots10^5$ см/с, что практически реализуется в ЛС современных СЭ.

Минимизация рекомбинационных потерь фототока в ЛС СЭ. Поверхность раздела сред полупроводник–диэлектрик всегда содержит определенное количество поверхностных состояний (ПС), залегающих в запрещенной зоне полупроводника, на которых осуществляется рекомбинация неосновных носителей

тока (ННТ). Поверхностная плотность этих состояний N_s и их параметры зависят от физических свойств граничащих сред и дефектного состава поверхности. Рекомбинационный поток ННТ на ПС согласно модели Шокли [1] определяется формулой

$$j_{ns} = j_{ps} = \frac{\alpha_n \alpha_p N_s (n_s p_s - n_i^2)}{\alpha_n (n_s + n_1) + \alpha_p (p_s + p_1)}. \qquad (51)$$

Здесь n_s и p_s – концентрации электронов и дырок у границы раздела сред; α_n и α_p – коэффициенты (скорости) захвата ННТ на ПС; n_1 и p_1 – параметры ПС:

$$n_1 = z_n \gamma_{ns},\ p_1 = z_p \gamma_{ps},\ n_1 p_1 = n_i^2$$

$$\gamma_{ns} = \exp\left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{kT}\right),\ \gamma_{ps} = \exp\left(-\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\upsilon}{kT}\right); \qquad (52)$$

z_n и z_p – плотности состояний электронов в свободной зоне и дырок – в валентной; n_i – концентрация носителей тока в собственном полупроводнике; $\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_c - \varepsilon_s$ – глубина залегания ПС в запрещенной зоне.

Общепринятой считается модель теплового равновесия носителей тока в объеме и поверхности полупроводника, согласно которой [1]:

$$n_s = n\beta_s,\ p_s = p\beta_s^{-1}, \qquad (53)$$

где $\beta_s = \exp\left(\frac{q\varphi_s}{kT}\right)$, φ_s – поверхностный потенциал; n и p – концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника.

Для описания рекомбинации ННТ в ЛС на границе с диэлектриком более справедливой является модель динамического равновесия между электронами в объеме полупроводника и на ПС. Согласно этой модели концентрация электронов на ПС

$$N_s f_s = \frac{N_s \left(\alpha_n n_s + \alpha_p p_1\right)}{\alpha_n (n_s + n_1) + \alpha_p (p_s + p_1)} \qquad (54)$$

определяет заряд ПС и, следовательно, его потенциал φ_s, а скорости захвата α_n и α_p регулируются высотой потенциального барьера $q\varphi_s$ в соответствии с уравнениями

$$\alpha_n = \alpha_n^0 \beta_s,\ \alpha_p = \alpha_p^0 \beta_s^{-1}, \qquad (55)$$

при этом $n_s \equiv n$ и $p_s \equiv p$.

Уравнения (51) и (54) для этого случая приобретают вид

$$j_{ns} = j_{ps} = \frac{N_s \alpha_n^0 \alpha_p^0 \left(np - n_i^2\right)}{\alpha_n^0 \beta_s \left(n + n_1\right) + \alpha_p^0 \beta_s^{-1} \left(p + p_1\right)}, \qquad (56)$$

$$f_s = \frac{\alpha_n^0 n \beta_s + \beta_s^{-1} \alpha_p^0 p_1}{\alpha_n^0 \beta_s \left(n + n_1\right) + \alpha_p^0 \beta_s^{-1} \left(p + p_1\right)}. \qquad (57)$$

В приближении $n >> p$ и $\Delta p >> p \geq p_1$, справедливым для ЛС, из (56) имеем

$$j_{ns} \approx \frac{N_s \Delta p}{2\beta_s}. \qquad (58)$$

В сильном электрическом поле в ЛС концентрация дырок и скорость их захвата на ПС $\alpha_p^0 \beta_s^{-1} \Delta p$ малы и тогда рекомбинационный поток $j_{ns} = j_{ps}$ также будет мал. Как отмечено выше, для создания сильного поля необходимо обеспечить технологию высокого градиента легирующей примеси в ЛС. Обычно градиентное поле E в лицевом слое n^+–p-Si СЭ достигает ~10^3 Вт/см и более. В принципе эффект поля можно усилить за счет контактной разности потенциалов на поверхности полупроводник–поверхностный диэлектрик. Как правило, любой диэлектрик обладает радиоэлектронным эффектом. Под действием ультрафиолетового солнечного излучения в электроде создается электрическое поле с контактным потенциалом $\Delta\varphi_k$ не менее половины ширины запрещенной зоны диэлектрика; оно может достигать 3…4 эВ при ширине запрещенной зоны диэлектрика 7…9 эВ. При этом на границе полупроводника, где расположен ПС, напряженность электрического поля возрастает до 10^4…10^5 В/см. Этого достаточно, чтобы ограничить доступ дырок к ПС.

Более точная оценка контактных полей, зарядов и потенциалов на поверхности ЛС затруднена из-за отсутствия информации об электрофизических свойствах и распределения дефектов у границ раздела сред. Из физических соображений следует, что в ЛС действительно много дефектов. Их образование обусловлено прежде всего тем, что n^+-слой представляет собой материал, перенасыщенный фосфором до пределов растворимости ($N_d \sim 10^{20}$…10^{21} см$^{-3}$). Это приводит к распаду раствора с выделением второй фазы с участием атомов кислорода ($N_O \approx 10^{18}$ см$^{-3}$) и частично углерода ($N_C \approx 10^{17}$ см$^{-3}$) и бора ($N_B \approx 10^{16}$ см$^{-3}$). Следует предполагать, что в таком ЛС кроме точечных дефектов (А-центров, Е-центров, акцепторно-донорных пар и других комплексов) образуются также и структурные дефекты. Они обнаруживаются по избыточному току обратно смещенного n^+–p-перехода СЭ, который на порядок выше теплового тока:

$$J_{\text{изб}} >> J_0 = q\left(\frac{n_p D_n}{L_n} + \frac{p_n D_p}{L_p}\right). \qquad (59)$$

Те из структурных дефектов, которые оказываются в области объемного заряда n^+–p-перехода, выявляются также с помощью микроплазм, возникающих при повышенном ($V_{\text{обр}} > 5$ В) обратном напряжении [8].

Все эти дефекты ухудшают электрофизические свойства ЛС: увеличивают омическое сопротивление и уменьшают время жизни ННТ (дырок). Необходима технология (n^+-слоя), которая бы обеспечивала максимальную электропроводность ЛС с максимальным градиентным (тянущим) полем и максимальной контрольной разностью потенциалов (КРП).

В заключение следует отметить, что количественная оценка фотоэлектрической эффективности ЛС может быть произведена по вышеприведенным уравнениям и формулам после уточнения концентрационного и дефектного состава ЛС и ПС, а также изучения

влияния излучения на КРП границы ЛС с диэлектриком. Прежде всего необходимы электронно-микроскопические исследования состава и распределения примесей и дефектов в поперечном сечении ЛС. Очень важной могла быть информация о зависимости электропроводности n^+-канала от электрического режима СЭ (в частном от выходного потенциала V).

Библиографические ссылки

1. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М. : Наука, 1977.

2. Зеегер К. Физика полупроводников. М. : Мир, 1977.

3. Васильев А. М., Ландеман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М. : Сов. радио, 1971.

4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. М. : Энергоатомиздат, 1987.

5. Ленченко В. М., Логинов Ю. Ю., Малков Д. О. Влияние омических потерь в лицевом n^+-слое на выходные характеристики СЭ n^+–p-типов // Вестн. Краснояр. гос. ун-та. Физ.-мат. науки. 2005. № 4. С. 33–39.

6. Преобразование солнечной энергии / под ред. Б. Серафима. М. : Энергоатомиздат, 1982.

7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 т. Т. 2. М. : Мир, 1984.

8. Ленченко В. М., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В. Лавинное умножение и излучательная рекомбинация носителей тока в кремниевых солнечных элементов // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30). 2010. С. 11–15.

V. M. Lenchenko, Yu. Yu. Loginov, A. V. Mozzherin

ANALYSIS OF HEAT AND PHOTON RECOMBINATION LOSSES IN SOLAR CELLS

Photoconversion efficiency of light into electrical current is limited by recombination, thermal and other losses of photon energy in the structures of solar cells, including those used in space vehicles. The equations describing the loss, adjusted the light dispersal ohmic losses in the surface layer. For the first time an assessment of the heat losses due to Peltier effect at the contacts of the circuit of solar cells. The ways to minimize recombination losses in the surface layer due to the electric field of contact charges are discussed.

Keywords: solar cells, photons, recombination, the photocurrent.

© Ленченко В. М., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., 2011

УДК 621.83.061.4

Г. Н. Лимаренко, М. П. Головин, М. В. Шевчугов

СИНТЕЗ ПРОФИЛЯ КУЛАЧКА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ВНУТРЕННИМ КОЛЬЦОМ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ В ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ

Приведены результаты теоретических исследований и методов расчета в ПК MathCad при синтезе диаграммы взаимодействия кулачка с толкателем в его относительном движении в приводе выходного звена – роликовой рейки поступательной волновой передачи, а также профиля плоского кулачка в генераторе волн, взаимодействующего с внутренним кольцом подшипника качения, установленного в толкателе.

Ключевые слова: диаграмма, толкатель, кулачок, профиль, кривизна, аналог скорости.

Волновые реечные передачи (ВРП) [1] по сравнению с обычными зубчатыми реечными передачами обладают рядом преимуществ, к которым относятся:

– большая редукция между входным валом и выходной рейкой (за один оборот вала рейка перемещается на один шаг зубьев);

– многопарность контакта в зацепляющихся звеньях, способствующая повышению плавности движения, жесткости, тягового усилия и точности;

– КПД, превышающий 85 % при большой редукции механизма;

– простота схемы выбора зазоров в зацеплении путем ортогонального подпружиненного сближения ведущих и ведомого звеньев;

– возможность передачи движения в герметичное (изолированное) пространство путем установки разделительной мембраны между ведущими звеньями и корпусом.

В ВРП используются промежуточные звенья в виде клиньев-толкателей и многокулачковый приводной вал. При установке на толкателях роликов, внешняя поверхность которых взаимодействует с кулачком, частота вращения ролика может достигать 4 000 мин$^{-1}$ и более. Такие частоты вращения требуют применения в конструкциях кулачковых механизмов прецизионных подшипников, принятия мер к снижению виброактивности и повышению долговечности, что ведет к удорожанию изделий.

Использование схемы взаимодействия плоского кулачка с внутренним кольцом подшипника, установленного в поступательно движущемся толкателе, позволяет многократно уменьшить частоту вращения подшипникового кольца, увеличить долговечность контакта при взаимодействии кулачка с толкателем, снизить виброактивность механизма.

Реализация такой схемы возможна лишь при решении двух задач: разработке теории синтеза взаимодействия кулачка с толкателем при относительном движении клиньев-толкателей в приводе выходного звена – например роликовой рейки по диаграмме, изображенной на рис. 1, и разработке теории синтеза профиля кулачка, взаимодействующего с внутренним кольцом подшипника.

При решении первой задачи представим диаграмму относительного движения, состоящую из восьми участков, два из которых являются горизонтальными отрезками прямых (участки 0–1 и 7–0). На рабочих участках диаграммы 2–3 и 5–6 толкатели взаимодействуют с роликами рейки, сообщая ей постоянную скорость. Закон движения на участках разгона (1–2), (4–5) и выбега (3–4), (6–7) толкателей вне контакта с роликами рейки может быть описан с помощью синусоидальных или других известных «безударных» ускорений, используемых при контакте кулачка с внешним роликом толкателя, предложенных, например, в работе [2].

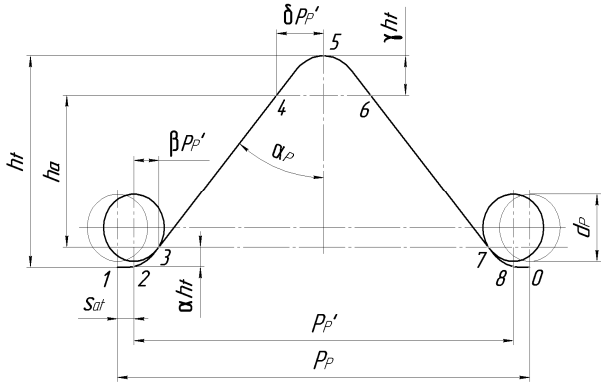


Рис. 1. Диаграмма относительного движения толкателя

Рассмотрим метод синтеза диаграммы относительного движения толкателя с прямолинейными участками при его удалении и приближении с заданной скоростью.

Для участка 1–2 примем синусоидальный закон изменения аналога ускорения (одну полуволну синусоиды)

$$S'_p(\varphi) = \frac{S_p \cdot \pi}{\varphi_p^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_p} \cdot \varphi\right), \qquad (1)$$

где S_p – величина удаления толкателя при повороте кулачка из исходного положения (точки 1) на угол. Интегрируя (1), получим закон изменения аналога скорости толкателя на участке:

$$S'_p(\varphi) = \int \frac{S_p \cdot \pi}{\varphi_p^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_p} \cdot \varphi\right) d\varphi = -\frac{S_p}{\varphi_p} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\varphi_p} \cdot \varphi\right) + C_1. \qquad (2)$$

Из граничных условий: при $\varphi = 0$, $S'_p(\varphi) = 0$ и $C_1 = S_p/\varphi_p$; при $\varphi = \varphi_p$ должно быть принято $S'_p(\varphi)\cdot\omega_k = V_{Tp}$, где V_{Tp} – максимальная скорость толкателя при разгоне (мм/с), ω_k – угловая скорость кулачка (рад/с). Отсюда получим зависимость

$$\frac{V_{Tp}}{\omega_k} = 2 \cdot \frac{S_p}{\varphi_p}, \qquad (3)$$

из которой можно рассчитать параметры передачи. Скорость толкателя в ВРП – $V_{Tp} = V_p/\mathrm{tg}\alpha_p$, а скорость рейки – $V_p = P_p \cdot n_k$, где α_p – угол клина на толкателе, n_k – частота вращения кулачка. Учитывая соотношение $\omega_k = \pi \cdot n_k/30$, преобразуем (3):

$$\frac{P_p}{2\pi \cdot \mathrm{tg}\alpha_p} = 2 \cdot \frac{S_p}{\varphi_p}. \qquad (4)$$

Выражение (4) необходимо использовать при кинематическом синтезе ВРП.

Интегрируя (2), получим уравнение перемещения толкателя на участке разгона:

$$S_p(\varphi) = \int \left(\frac{-S_p}{\varphi_p} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\varphi_p} \cdot \varphi\right) + C\right) d\varphi = S_p\left(\frac{\varphi}{\varphi_p} - \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_p} \cdot \varphi\right)\right) + C_2. \qquad (5)$$

Из граничных условий получим: если $\varphi = 0$, то $S_p(\varphi) = 0$ и, следовательно, $C_2 = 0$; если $\varphi = \varphi_p$, то $S_p(\varphi_p) = S_p$.

На линейном участке 2–3 диаграммы закон перемещения толкателя запишем в виде уравнения прямой

$$S_l(\varphi) = S_{pm} + \left(\frac{h_a}{\varphi_l}\right) \cdot \varphi, \qquad (6)$$

где S_{pm} – максимальное удаление толкателя на участке разгона, $\varphi_p \le \varphi \le (\varphi_p + \varphi_l)$, φ_l – угол поворота кулачка и h_a – ход толкателя на участке 2–3.

Для участка выбега 3–4 диаграммы также примем синусоидальный закон изменения аналога ускорения

$$S'_B(\varphi) = \left(\frac{S_B \cdot \pi}{\varphi_B^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_B} \cdot \varphi\right)\right), \qquad (7)$$

где $S_B = \gamma \cdot h_t$ – величина удаления толкателя при повороте кулачка на угол $(\varphi_p + \varphi_l) \le \varphi_B \le \pi$. Интегрируя (7), получим закон изменения аналога скорости толкателя на участке:

$$S'_B(\varphi) = \int -\left(\frac{S_B \cdot \pi}{\varphi_B^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_B} \cdot \varphi\right)\right) d\varphi = \frac{S_B}{\varphi_B} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\varphi_B} \cdot \varphi\right) + C_3. \qquad (8)$$

Из граничных условий: при $\varphi = \varphi_B$ (в точке 4) должно быть принято $S'_B(\varphi) = 0$. После вычислений получаем выражение постоянной интегрирования $C_3 = S_B/\varphi_B$. Тогда при $(\varphi) = 0$ (в точке 3) получим $S'_B(\varphi) = 2S_B/\varphi_B$.

Интегрируя (8), получим уравнение перемещения толкателя на участке:

$$S_B(\varphi) = \int\left(\frac{S_B\cdot\pi}{\varphi_B}\cdot\cos\left(\frac{\pi}{\varphi_B}\cdot\varphi\right)+C_3\right)d\varphi = \\ = S_B\cdot\left(\frac{\varphi}{\varphi_B}-\left(\frac{1}{\pi}\right)\cdot\sin\left(\frac{\pi}{\varphi_B}\cdot\varphi\right)\right)+C_4. \quad (9)$$

Из граничных условий: при $S_B(\varphi_B) = S_B$, и постоянная интегрирования $C_4 = 0$.

С помощью вышеописанной методики были созданы расчетный и программный модуль в MathCAD для апробирования алгоритмов проектирования диаграммы движения толкателя и рейки в ВРП со следующими исходными данными: $P_p = 20$ мм, $d_p = 5{,}5$ мм, $S_{at}/P_p = 0{,}025$ мм, $Z = 8$, $\mu = 2$, $\alpha_p = 31°$.

При синтезе получены параметры: $h_t = 12{,}06$ мм, $h_a = 8{,}32$ мм, $\alpha = 0{,}162$, $\beta = 0{,}124$, $\delta = 0{,}113$, $\gamma = 0{,}148$. Расчеты, выполненные по программе, позволили определить координаты перемещения толкателя, а также значения его аналогов скорости и ускорения на участке удаления в функции поворота кулачкового вала (рис. 2).

На участке приближения толкателя координаты перемещения толкателя (рис. 2, *а*), а также значения его аналогов скорости (рис. 2, *б*) и ускорения (рис. 2, *в*) в функции поворота кулачка будут симметричными относительно центральной оси кулачка, проходящей через наиболее удаленную его точку (угол поворота вала равен 1 800).

Получены:

– расчетная скорость рейки при частоте вращения вала $n_k = 1\,000$ мин$^{-1}$:

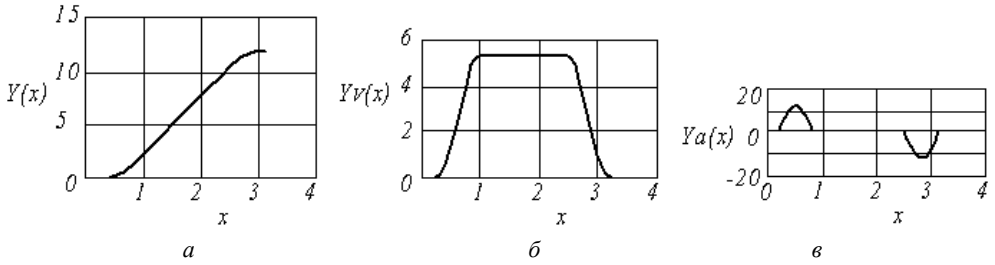
$$V_p = S'(\varphi)\cdot\mathrm{tg}(\alpha_p)\cdot\pi\cdot\frac{n_k}{30} = \\ = 5{,}298\cdot 0{,}6\cdot 104{,}72 = 0{,}33 \text{ м/с};$$

– тяговое усилие на рейке, вычисленное по зависимости [3]:

$$F_t = d_p\cdot b_p\cdot\left(\frac{\sigma_{HP}}{k_D}\right)^2 = 5{,}52\cdot 2{,}85\cdot\left(\frac{1\,320}{340}\right)^2 = 1\,300 \text{ Н},$$

где d_p, $d_p = \psi_{bd}\cdot d_p$ – диаметр и длина ролика (цевки) на рейке; σ_{HP} – допускаемое контактное напряжение при взаимодействии с толкателем, $k_D = 300\ldots350$, $\psi_{bd} = 2{,}8\ldots3$ – параметры конструкции.

При решении второй задачи – разработке метода синтеза профиля плоского кулачка при его взаимодействии с внутренним кольцом подшипника, рассмотрим некоторые особенности геометрии контакта. Точки контакта кулачка и кольца совпадают с осью Y (рис. 3) только в точках 0, 3, и 6 диаграммы (см. рис. 1). При повороте кулачка 1 вокруг оси O_1 в направлении по ходу часовой стрелки его увеличивающийся на участке подъема вектор-радиус p_i вступает в контакт с кольцом подшипника 2 в точке K.



а *б* *в*

Рис. 2. Графики при удалении толкателя в функции угла поворота кулачкового вала:
а – перемещения; *б* – аналога скорости; *в* – аналога ускорения

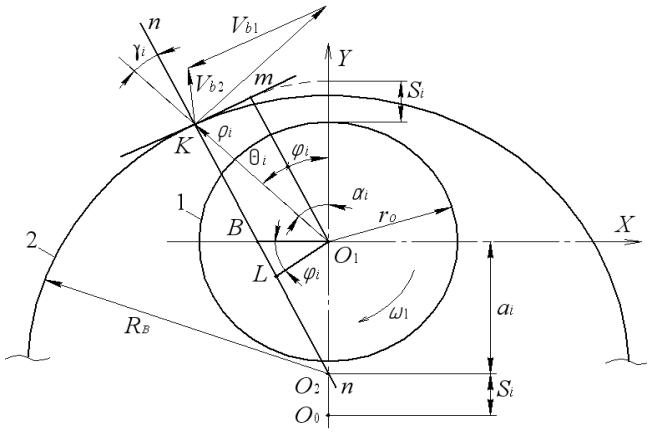


Рис. 3. Схема взаимодействия кулачка 1 с подшипником 2

Общая нормаль n–n, проведенная через точки K и O_2, образует с вектором-радиусом p_i угол γ_i, равный углу давления θ_i. Вектор-радиус p_i с осью Y системы координат кулачка образует угол α_i. Расстояние между осью вращения кулачка O_1 и центром подшипника O_2 есть разность между начальным межцентровым расстоянием a_0 и текущим перемещением толкателя h_i: $a_i = a_0 - S_i$.

Для определения полярных координат профиля кулачка по заданным координатам диаграммы относительного движения толкателя необходимо вычислить значения радиус-векторов p_i в точке контакта K и угла α_i для углового положения φ_i кулачка и смещения толкателя S_i.

За основу синтеза профиля кулачка в нашем случае можно принять известную методику синтеза кулачка для механизма с тарельчатым толкателем [4]. При взаимодействии кулачка с внутренним кольцом подшипника должны быть выполнены также дополнительные условия синтеза:

1) профили участков кулачка должны быть выпуклыми;

2) радиусы кривизны профилей на участках должны быть меньше радиуса внутреннего кольца подшипника;

3) скорости движения толкателя в точках сопряжения участков разгона (выбега) с линейными участками должны совпадать.

Предварительные исследования показали, что угол давления θ_i в механизме не превышает 14°. Учитывая это, минимальный радиус кулачка, выполненного заодно с валом, может быть принят из конструктивных соображений по зависимости $r_0 = 0{,}5d + 0{,}5$ мм, где d – диаметр приводного вала, подбираемого по условию изгибной жесткости. В соответствии с расчетной схемой вала (рис. 4) момент инерции его сечения вычисляют по формуле [5]

$$J = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{Q_B \cdot a \cdot \left(3L^2 - 4a^2\right)}{24 \cdot E \cdot f_{\max}}, \qquad (10)$$

где Q_B – усилие на толкателе; $f_{\max}$ – допустимая величина прогиба вала в середине пролета; $L \cong P_t \cdot (z + 1)$ – межопорная длина вала; $P_t = P_p \cdot (1 + 1/z)$ – шаг установки толкателей.

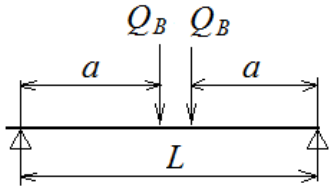


Рис. 4. Расчетная схема кулачкового вала

Усилие Q_B определяется по тяговому усилию на рейке:

$$Q_B = F_t \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\alpha_p + \rho\right)}{\mu}, \qquad (11)$$

где ρ – угол трения в контакте; μ – количество одновременно взаимодействующих с рейкой толкателей; $a = P_t \cdot z/2$. Вычисленный по зависимости (10) при допустимом прогибе $f_{\max} = 20$ мкм, диаметр приводного вала d равен 24,5 мм.

План скоростей механизма для точки K построен на рис. 3. Этот план подобен треугольнику O_1BK по условию взаимной перпендикулярности сторон. Из подобия треугольников следует, что отрезок O_1B равен аналогу скорости толкателя:

$$O_1B = \frac{V_{b2}}{\omega_1} = \frac{ds}{d\varphi} = S'. \qquad (12)$$

Определение полярных координат кулачка выполним по следующему алгоритму:

1. Определяем сторону O_1L в треугольнике O_1BL:

$$O_1L = O_1B \cdot \cos\varphi_i. \qquad (13)$$

2. Отрезок LK по построению равен отрезку O_1m. Отсюда

$$LK = r_0 + S_i. \qquad (14)$$

3. Вычисляем полярный радиус-вектор:

$$p_i = \sqrt{\left(O_1L\right)^2 + \left(LK\right)^2}. \qquad (15)$$

4. Определяем угол между радиус-вектором p_i и нормалью n–n:

$$\gamma_i = \theta_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{O_1L}{LK}\right). \qquad (16)$$

5. Определяем полярный угол

$$\alpha_i = \theta_i + \varphi_i. \qquad (17)$$

Проверку соблюдения условий выпуклости кривизны профиля выполним по известному выражению для плоских кривых [6]:

$$R_K = \frac{\left(\sqrt{\rho_i^2 + \left(\frac{d\rho_i}{d\varphi_i}\right)^2}\right)^2}{\rho_i^2 + 2\left(\frac{d\rho_i}{d\varphi_i}\right)^2 - \rho_i \cdot \frac{d^2\rho_i}{d\varphi^2}}. \qquad (18)$$

Условия сопряжения участков выполним с помощью выражения (4).

В соответствии с разработанным алгоритмом рассчитаны параметры плоского кулачка, в том числе радиус кривизны профиля, построенного в MathCad для участка удаления толкателя (рис. 5).

Профиль кулачка – равномерно выпуклый с максимальным радиусом $R \approx 23{,}9$ мм. Кулачок может взаимодействовать с внутренним кольцом подшипника, диаметр которого не менее 35 мм.

Конструктивная схема одного из разработанных вариантов поступательного привода с зубчатыми толкателями и установленными в них подшипниками

качения, внутренние кольца которых взаимодействуют с кулачковым валом, представлена на рис. 6.

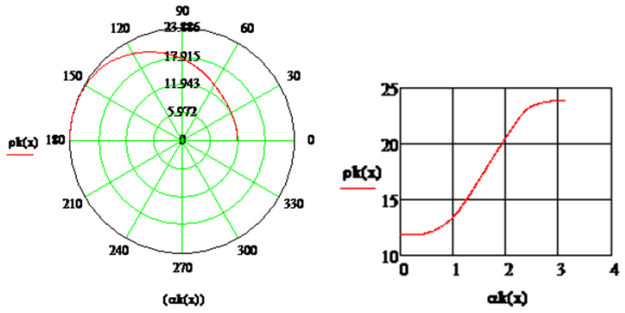


Рис. 5. Расчетный профиль кулачка и его радиус кривизны на участке удаления толкателя

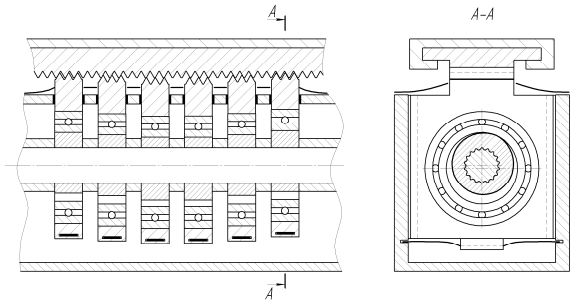


Рис. 6. Волновой зубчатый реечный модуль

Таким образом, в данном исследовании разработана методика и программа расчета диаграммы относительного движения толкателя в кулачковом приводе волновой реечной передачи, отличающаяся от известных методик наличием в диаграмме участка линейного перемещения толкателя, обеспечивающего поступательное движение роликового выходного звена с заданной постоянной скоростью.

Разработан метод синтеза плоского кулачка, взаимодействующего с внутренним кольцом подшипника качения, установленного в толкателе для увеличения быстродействия и повышения долговечности волновой реечной передачи.

Выполненные теоретические исследования позволяют повысить качество проектных решений и ускорить конструкторскую подготовку производства новых типов вводов линейного перемещения для машиностроения.

Библиографические ссылки

1. А. с. 1043392 СССР. Волновая реечная передача с промежуточными звеньями в виде клиньев / Г. Н. Лимаренко, М. В. Шевчугов. № 2925708/25-28 ; заявл. 16.105.1980 ; опубл. 23.09.1983, Бюл. № 35.

2. Теория механизмов и механика машин : учеб. для вузов / К. В. Фролов, К. В. Попов, А. К. Мусатов и др. ; под ред. К. В. Фролова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.

3. Лимаренко Г. Н. Разработка методов расчета и проектирования волновых реечных механизмов для поступательных приводов робототехники : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 1988.

4. Юдин В. А., Петрокас Л. В. Теория механизмов и машин. М. : Высш. шк., 1977.

5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений (расчетно-теоретический) : в 2 кн. Кн. 2. / под ред. А. А. Уманского. М. : Госстройиздат, 1973.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М. : Наука, 1973.

G. N. Limarenko, M. P. Golovin, M. V. Shevchugov

SYNTHESIS OF CAM CONTOUR INTERACTING INNER RING IN TRANSLATIONAL HARMONIC GEAR DRIVE

The article presents results of theoretical researches and calculation methods on PC MathCad in diagram synthesis of cam interaction with pusher in its relative motion in output unit drive – rolling rack of translational harmonic gear drive, and a contour of planar cam in a wave former interacting with an inner ring adjusted in a pusher.

Keywords: diagram, pusher, cam, contour, velocity analog.

© Лимаренко Г. Н., Головин М. П., Шевчугов М. В., 2011

УДК 519.713

П. К. Лопатин

АЛГОРИТМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА В СРЕДЕ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Рассматривается алгоритм управления n-звенным манипуляционным роботом (МР) в среде с неизвестными статическими препятствиями. Доказывается теорема, утверждающая, что, двигаясь по данному алгоритму, МР за конечное число шагов либо достигнет целевой конфигурации, либо выдаст обоснованный ответ о том, что целевая конфигурация не может быть достигнута. Приводятся следствия из теоремы, способствующие лучшему функционированию МР в неизвестной среде.

Ключевые слова: робот, неизвестная среда, препятствия, достижимость.

При управлении МР типичной является следующая задача: МР должен выдвинуться из стартовой конфигурации $\boldsymbol{q}^0$ и передвинуться в целевую конфигурацию $\boldsymbol{q}^T$.

МР представляется в пространстве конфигураций (пространстве обобщённых координат) как точка. Функционирование МР должно происходить в пределах ограниченной области X конфигурационного пространства. Будем считать, что область X имеет такой вид, что для любого $\boldsymbol{q} \in X$ выполняются неравенства

$$\boldsymbol{a}^1 \le \boldsymbol{q} \le \boldsymbol{a}^2, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{a}^1 = (a_1^1, a_2^1, \ldots, a_n^1)$ – вектор нижних ограничений на значения обобщённых координат, $\boldsymbol{a}^2 = (a_1^2, a_2^2, \ldots, a_n^2)$ – вектор верхних ограничений на значения обобщённых координат, $\boldsymbol{q} = (q_1, q_2, \ldots, q_n)$ – вектор обобщённых координат МР. Таким образом, область X представляет собой гиперпараллелепипед.

При этом:

1) точки, находящиеся вне (1), квалифицируются как запрещенные, и в дальнейшем мы будем называть их запрещёнными в смысле (1);

2) внутри X также могут присутствовать запрещенные состояния. Во-первых, это те состояния (конфигурации), которые обусловлены конструктивными ограничениями МР, например, те, в которых происходит недопустимое взаимопересечение звеньев. Такие запрещённые конфигурации удаётся вычислить заранее и мы будем называть их запрещёнными в смысле (2). Во-вторых, запрещённой является та конфигурация, в которой МР налегает на препятствия. В условиях неизвестной среды все такие конфигурации вычислить заранее невозможно. Перед началом движения информации о запрещённых состояниях в X нет или она неполна. Точки из X, про которые нет достоверной информации о том, что они запрещённые, считаем разрешёнными.

Рассмотрим теперь конфигурацию (точку в конфигурационном пространстве) $\boldsymbol{q}^T$. Точку $\boldsymbol{q}^T \in X$ будем считать разрешённой только в случае, если она удовлетворяет сразу двум критериям: 1) она не является запрещённой в смыслах (1) и (2); 2) в неё можно попасть за конечное число шагов из $\boldsymbol{q}^0$, двигаясь в X по разрешённым состояниям. Считаем, что до начала движения у МР нет достоверной информации про точку $\boldsymbol{q}^T$ о том, является ли она разрешённой или запрещённой.

Теперь сформулируем следующую *Задачу* управления МР в неизвестной статической среде: даны стартовая конфигурация МР $\boldsymbol{q}^0 \in X$ и целевая конфигурация $\boldsymbol{q}^T \in X$. Требуется предложить алгоритм, который за конечное число шагов либо передвинет МР из $\boldsymbol{q}^0$ в $\boldsymbol{q}^T$, либо выдаст обоснованный ответ о том, что $\boldsymbol{q}^T$ не является разрешённой.

Обзор литературы. К настоящему времени имеются работы по алгоритмам управления робототехническими системами в известной и неизвестной среде. Сделаны хорошие обзоры таких алгоритмов [1–3]. Предложены алгоритмы, гарантирующие нахождение пути в среде с известными препятствиями при условии, что такой путь существует [2–5].

Некоторые алгоритмы планирования в известной среде в принципе могут быть использованы для движения в неизвестной среде. Если мы дискретизируем пространство состояний, то тогда можно будет использовать графовые методы поиска пути движения МР из $\boldsymbol{q}^0$ в $\boldsymbol{q}^T$ [2; 3; 6]. Однако эти алгоритмы имеют одно общее свойство, которое затрудняет их применение для управления МР в неизвестной среде, заключающееся в том, что они в том или ином объеме требуют осуществлять поиск в ширину, иначе не гарантируется достижение целевой точки [7]. Но при поиске в ширину часто возникает следующая ситуация: предположим, что мы только что закончили рассмотрение вершин, соседних к вершине $\boldsymbol{q}$, и теперь нам надо рассматривать вершины, соседние вершине $\boldsymbol{q}'$, и вершины $\boldsymbol{q}$ и $\boldsymbol{q}'$ не являются соседними. Для того чтобы рассмотреть вершины, соседние к $\boldsymbol{q}'$, МР должен сначала передвинуться в $\boldsymbol{q}'$. Таким образом, вновь возникает задача планирования маршрута из $\boldsymbol{q}$ в $\boldsymbol{q}'$, что делает общую сумму перемещений МР очень большой. При планировании же в известной среде ЭВМ просто «переключает свое внимание» от $\boldsymbol{q}$ к $\boldsymbol{q}'$, которые хранятся в памяти ЭВМ. В соответствии с классификацией [3], представителями алгоритмов поиска в ширину являются собственно алгоритм поиска в ширину, алгоритм A^*, эвристический поиск «первый-лучший», ленивый вероятностный маршрут, динамическое программирование. В методах, основанных на случайном потенциальном поле, алгоритме «Нить Ариадны», быстроисследующих случайных

деревьях [3] новые вершины генерируются случайным образом и потому применение таких методов ведет к тем же трудностям. Подходы, основанные на разделении ячеек, графах видимости [3] сводятся к попеременному построению графа и поиску пути на нем и, таким образом, им также присущ вышеописанный недостаток, связанный со множественными механическими перемещениями.

В алгоритме, представленном в данной статье, вершины $\boldsymbol{q}$ и $\boldsymbol{q}'$ всегда являются соседними, что сокращает количество движений.

Известно также, что алгоритмы поиска в глубину не всегда доводят до цели [7].

Имеется общая трудность для методов планирования пути в среде с известными препятствиями: очень трудно собрать полную информацию о рабочем пространстве робота заранее и представить эту информацию в виде, пригодном для планирования пути. При рассмотрении нашего алгоритма можно будет видеть, что для системы управления нет необходимости собирать полную информацию о рабочем пространстве заранее, МР будет собирать необходимую информацию сам в ограниченных количествах и в терминах обобщенных координат, что удобно для планирования пути.

Предпринимаются попытки создания алгоритмов управления для среды с неизвестными препятствиями. В большинстве из них рассматриваются двумерные случаи [8].

В [9–12] рассмотрены различные подходы к управлению роботами в двумерном неизвестном пространстве. В [9; 12] представлен подход, основанный на диаграмме Вороного, в [11] – поиск на основе табу-подхода. Поскольку эти подходы требуют попеременного построения графа и поиска пути на нем, они ведут к многочисленным перемещениям робота. В [10] препятствия должны иметь многоугольную форму. Применение методов, предложенных в [9–12], к управлению n-звенным манипуляционным роботом в неизвестной среде, не представлено.

В [8] представлен алгоритм управления МР среди неизвестных препятствий, расположенных в трехмерном декартовом пространстве. МР должен иметь не более трех звеньев и последняя кинематическая пара должна быть поступательной. При вышеуказанных предварительных условиях алгоритм за конечное число шагов либо переводит МР в целевую конфигурацию, либо сообщает о том, что она недостижима.

В [13] рассмотрен n-мерный случай. Алгоритм основан на решении системы нелинейных уравнений методом Ньютона и потому не может гарантировать достижения целевой позиции.

Для управления МР в неизвестной среде предлагается использовать метод искусственных потенциалов [14]. В этом методе робот представляется в виде заряженной точки, запрещённые состояния наделяются отталкивающими потенциалами, целевая точка – притягивающим потенциалом. В общем случае нет гарантии, что будет решена задача обнаружения пути, не налегающего на запрещённые точки [2].

В [3] рассмотрены алгоритмы движения роботов в присутствии неопределенности (включая случаи неизвестной среды). Алгоритмы основаны на теории последовательных решений. В общем случае алгоритмы не гарантируют достижения цели. В случаях, когда алгоритмы используют поиск на графе, возникает вышеупомянутая трудность, связанная со множественными механическими перемещениями.

Предварительные условия. Прежде чем привести алгоритм перемещения МР, оговорим предварительные условия.

1. Считаем, что у нас есть программная процедура ПИ($\boldsymbol{q}^n$, $\boldsymbol{q}^T$, *ZAPR*), где $\boldsymbol{q}^n$ есть текущая конфигурация МР, т. е. та конфигурация, в которой МР в настоящий момент находится, $\boldsymbol{q}^T$ – целевая конфигурация МР, *ZAPR* – множество запрещённых точек в X, сообщенных процедуре ПИ(). Может быть два исхода работы ПИ().

1.1. Она за конечное число шагов генерирует в X путь $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, удовлетворяющий следующим условиям:

1.1.1. $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ исходит из $\boldsymbol{q}^n$ и приходит в $\boldsymbol{q}^T$;

1.1.2. $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T) \cap ZAPR = \varnothing$, т. е. $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ ни одной своей точкой не налегает ни на одну из сообщенных запрещённых точек;

1.1.3. $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ удовлетворяет (1).

В этом случае процедура ПИ() возвращает ДА.

1.2. Ей не удается сгенерировать в X путь $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, удовлетворяющий всем трем условиям 1.1.1–1.1.3.

В этом случае процедура ПИ() возвращает НЕТ.

Для процедуры ПИ() уже существуют алгоритмы, например, алгоритм полного перебора или алгоритм А* [6].

2. Расположение и количество препятствий внутри рабочей зоны МР остаётся неизменным в течение всего времени движения МР.

3. Всё движение, в том числе и результирующий путь, должно происходить в гиперпараллелепипеде (1).

4. МР имеет сенсорную систему (СС), которая доставляет информацию об r-окрестности текущей точки МР $\boldsymbol{q} \in X$. Текущая точка МР – это та точка, в которой МР в настоящий момент находится. Под r-окрестностью $\boldsymbol{q}$ понимаем гипершар в X с центром в $\boldsymbol{q}$ и радиусом $r > 0$. Множество всех точек, входящих в r-окрестность точки $\boldsymbol{q}$, обозначаем $Y(\boldsymbol{q})$. Разрешённые конфигурации из $Y(\boldsymbol{q})$ будем помещать в множество $Z(\boldsymbol{q})$, запрещённые – в $Q(\boldsymbol{q})$. $Z(\boldsymbol{q}) \cup Q(\boldsymbol{q}) = Y(\boldsymbol{q})$. Как уже говорилось, разрешённой считается та конфигурация, которая удовлетворяет всем следующим критериям: 1) она не является запрещенной в смысле (1); 2) она не является запрещенной в смысле (2); 3) в ней ни одна точка МР не принадлежит внутренней области хотя бы одного препятствия. Если $\boldsymbol{q}$ не удовлетворяет хотя бы одному из этих трёх условий, то она считается запрещённой. Относительно каждой точки $\boldsymbol{q}^* \in Y(\boldsymbol{q})$ СС всегда доставляет достоверную информацию, является ли она разрешенной или нет. Способ записи множеств $Y(\boldsymbol{q})$, $Z(\boldsymbol{q})$, $Q(\boldsymbol{q})$ может быть разным – в виде формул, списков, таб-

лиц и т. д., но мы считаем, что он есть. Устройство СС в данной работе не рассматривается.

5. Исполнение пути происходит следующим образом. МР находится в текущей точке $\boldsymbol{q}$ и, если следующая точка $\boldsymbol{q}^*$ пути удовлетворяет всем трём критериям, а именно:

1) она не является запрещённой в смысле (1);

2) не является запрещённой в смысле (2);

3) не налегает на препятствия,

то МР переходит в $\boldsymbol{q}^*$. Если же в отношении хотя бы одного из критериев (1–3) получен ответ НЕТ, то в $\boldsymbol{q}^*$ МР не переходит.

Алгоритм. Ниже приведён алгоритм решения нашей *задачи*. Перед началом работы $n = 0$.

Шаг 1. МР находится в $\boldsymbol{q}^n$ (назовём её «точка смены пути»). СС доставляет информацию о $Y(\boldsymbol{q}^n)$, $Z(\boldsymbol{q}^n)$, $Q(\boldsymbol{q}^n)$.

Шаг 2. Если $\boldsymbol{q}^T \in Q(\boldsymbol{q}^n)$, происходит окончание работы алгоритма с сообщением о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является запрещенной, а значит, недостижимой. Если $\boldsymbol{q}^T \notin Q(\boldsymbol{q}^n)$, происходит переход на *Шаг 3*.

Шаг 3. Вызывается процедура ПИ($\boldsymbol{q}^n$, $\boldsymbol{q}^T$, $\bigcup_{i=0}^{n} Q(\boldsymbol{q}^i)$)

(т. е. нужно спланировать путь из из $\boldsymbol{q}^n$ в $\boldsymbol{q}^T$, обходящий все известные на настоящий момент запрещенные точки и лежащий целиком в (1)). Если ПИ() возвращает ДА, алгоритм переходит на *Шаг 4*, если ПИ() возвращает НЕТ, то происходит окончание работы алгоритма с сообщением о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является недостижимой, а значит, запрещенной.

Шаг 4. МР начинает движение по $L(\boldsymbol{q}^n,\boldsymbol{q}^T)$. Исходов движения может быть два: 1) МР попадает в разрешенную точку $\boldsymbol{q}^T$. В этом случае происходит окончание работы алгоритма с сообщением о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является достижимой и разрешенной; 2) МР придёт в некоторую точку $\boldsymbol{q}^*$, следующая за которой является запрещённой. В этом случае выполняем $n := n + 1$, $\boldsymbol{q}^n := \boldsymbol{q}^*$ и алгоритм переходит на *Шаг 1*.

Конец алгоритма.

Теорема. Исполняя алгоритм, МР решит *задачу* за конечное число шагов.

Доказательство. В алгоритме, когда МР находится в точке $\boldsymbol{q}^n$, $n = 0, 1, 2, \ldots$, происходит запуск СС и запуск процедуры ПИ. Если в результате исполнения этих действий точка $\boldsymbol{q}^T$ будет определена как запрещённая (в силу принадлежности множеству $Q(\boldsymbol{q}^n)$ (определяется на *Шаге 2*), либо в силу невозможности спланировать путь с помощью процедуры ПИ (определяется на *Шаге 3*)), происходит окончание работы алгоритма с сообщением о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является запрещенной, а значит, недостижимой. Если в результате исполнения *Шага 2* и *Шага 3* точка $\boldsymbol{q}^T$ не будет определена как запрещённая, происходит генерация пути $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ и МР начнёт исполнять этот путь. Исполнение этого пути может иметь два исхода: либо МР, не встретив на своём пути запрещённых точек, достигнет $\boldsymbol{q}^T$ и она окажется разрешённой (и тогда произойдёт успешное окончание работы алгоритма с сообщением о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является разрешенной), либо МР придёт в точку $\boldsymbol{q}^n$, $n = 1, 2, \ldots$, следующая за которой будет запрещённой. Покажем, что все точки смены пути $\boldsymbol{q}^n$, $n = 0, 1, 2, \ldots$ будут различными и их число будет конечным.

Покажем, что все точки смены пути различны. Предположим, что МР сменил путь, находясь в точке $\boldsymbol{q}^s$, а потом, находясь в точке $\boldsymbol{q}^p$, вновь сменил путь, т. е. $s < p$. Покажем, что $\boldsymbol{q}^s \neq \boldsymbol{q}^p$. Предположим сначала, что $\boldsymbol{q}^s = \boldsymbol{q}^p$ и тогда $Q(\boldsymbol{q}^s) = Q(\boldsymbol{q}^p)$. Поскольку МР сменил путь, находясь в точке $\boldsymbol{q}^s$, то он сгенерировал путь, не налегающий в том числе и на $Q(\boldsymbol{q}^s)$. Но поскольку МР сменил путь в точке $\boldsymbol{q}^p$, то это означает, что его путь налёг на $Q(\boldsymbol{q}^p) = Q(\boldsymbol{q}^s)$ (при этом $\boldsymbol{q}^s = \boldsymbol{q}^p$ является центром r-окрестности точки $\boldsymbol{q}^s = \boldsymbol{q}^p$ и следующая за ней точка является запрещенной), т. е. $Q(\boldsymbol{q}^p) = Q(\boldsymbol{q}^s)$ не было известным. Получили противоречие. Отсюда видно, что все точки смены пути различны.

Покажем теперь, что число точек смены пути конечно. Предположим, что, наоборот, оно бесконечно. Все точки смены пути должны удовлетворять ограничениям (1). Это означает, что последовательность этих точек ограничена. Согласно теореме Больцано–Вейерштрасса, из этой последовательности можно извлечь сходящуюся подпоследовательность $\boldsymbol{q}^i$, $i = 1, 2, \ldots$ В соответствии со свойством Коши сходящихся последовательностей, для любого ε можно найти такой номер s, что все точки $\boldsymbol{q}^i$, $i > s$, будут лежать в ε-окрестности точки $\boldsymbol{q}^s$. Возьмем $\varepsilon < r$. Рассмотрим произвольную точку смены пути $\boldsymbol{q}^i$, расположенную в ε-окрестности точки $\boldsymbol{q}^s$. Так как МР, находясь в $\boldsymbol{q}^i$, сменил свой путь, то это означает, что путь налёг на множество $Q(\boldsymbol{q}^s)$ ($\boldsymbol{q}^i$ и ее соседние точки принадлежат $Q(\boldsymbol{q}^s)$). Отсюда надо сделать вывод, что множество $Q(\boldsymbol{q}^s)$ не было учтено при генерации пути, приведшего в $\boldsymbol{q}^i$, что невозможно при исполнении предписаний алгоритма. Таким образом, если принять, что число точек смены пути бесконечно, то неизбежно возникнет ситуация, которая не может наступить при исполнении предписаний алгоритма. Следовательно, число точек смены маршрута конечно.

Итак, число точек смены пути $\boldsymbol{q}^n$, $n = 0, 1, 2, \ldots$ конечно, и они все различны. В каждой точке $\boldsymbol{q}^n$ осуществляется запуск СС и вызов процедуры ПИ(), генерирующей $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$. В результате выполнения этих действий либо получаем информацию о том, что $\boldsymbol{q}^T$ является запрещённой, либо нет. Если получаем, выяснение вопроса о достижимости $\boldsymbol{q}^T$ заканчивается выводом о недостижимости $\boldsymbol{q}^T$. Если не получаем, происходит планирование пути $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ и его исполнение. Если в последней точке смены пути $\boldsymbol{q}^n$ путь в $\boldsymbol{q}^T$ был спланирован, этот путь будет исполнен, $\boldsymbol{q}^T$ будет достигнута и она окажется разрешенной.

В каждой точке смены пути $\boldsymbol{q}^n$ происходит вызов процедуры ПИ() для планирования пути $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ с последующим его исполнением. Число вызовов процедуры ПИ() конечно. Планирование пути на любом

вызове ПИ() происходит за конечное число шагов. Исполнение любого пути, спланированного в ПИ(), происходит за конечное число шагов в силу конечности длины пути. Отсюда видно, что решение *задачи* сводится к решению конечного числа задач планирования и исполнения пути в среде с известными запрещёнными состояниями и осуществится за конечное число шагов.

Теорема доказана.

Иногда требуется интенсивное исследование окружающей среды, предполагающее сходы с предварительно спланированного пути. Для таких случаев будут полезны приводимые ниже следствия.

Следствие 1. В произвольных точках $\boldsymbol{q}^d$, $d = 0, 1, ..., N_{dn}$ исполняемого пути $L(\boldsymbol{q}^n,\boldsymbol{q}^T)$, где $n = 0, 1, \ldots,$ и N_{dn} – некоторое конечное число, не большее, чем число точек в $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, МР может сделать конечное число сходов с $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$. Сходом является последовательность S непрерывно следующих одна за другой разрешенных точек, отличающаяся от $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ и удовлетворяющая (1). Сходы делаются для исследования окружающей среды. Число шагов на каждом сходе должно быть конечным. На каждом шаге схода МР может исследовать окружающую среду. Осуществив конечное число шагов на сходе, МР должен вернуться на первоначальный путь точно по ранее пройденным точкам схода. Если на каком-то шаге схода обнаруживается, что дальнейшее движение невозможно в силу наличия запрещенных состояний, МР должен вернуться на первоначальный путь точно по ранее пройденным точкам схода. Таким образом, смены пути не происходит. Если МР вернётся не в точку $\boldsymbol{q}^d \in L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, с которой он сошёл, а на какую-то другую точку $\boldsymbol{q}^e \in L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, то точки из $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ между $\boldsymbol{q}^d$ и $\boldsymbol{q}^e$ могут оказаться запрещёнными и, когда впоследствии МР попытается исполнить $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$, он натолкнётся на эти ранее не обнаруженные запрещённые точки. По возвращении на $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ МР осуществляет движение в соответствии с алгоритмом. В результате мы получаем конечное число шагов на всех сходах, которое прибавляется к конечному числу шагов по алгоритму.

Следствие 2. МР также может, находясь в какой-либо точке $\boldsymbol{q}$ пути или схода, получив информацию о $Q(\boldsymbol{q})$, предварительно выполнив $n := n + 1$ и $\boldsymbol{q}^n = \boldsymbol{q}$ спланировать новый путь $L(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T)$ путём вызова процедуры ПИ$(\boldsymbol{q}^n, \boldsymbol{q}^T, \bigcup_{i=0}^{n} Q(\boldsymbol{q}^i))$ и начать двигаться по нему в соответствии с алгоритмом. Иными словами, это такое действие (назовем его «отказ от предварительного пути»), когда, не достигнув $\boldsymbol{q}^T$, планируют новый путь, ведущий в $\boldsymbol{q}^T$. Делать отказы от предварительного пути можно лишь конечное число раз, а после этого МР, пройдя конечное число шагов по разрешенным точкам и находясь в некотором состоянии $\boldsymbol{q}$, должен выполнить $n := n + 1$ и $\boldsymbol{q}^n = \boldsymbol{q}$ и перейти к выполнению алгоритма, гарантирующего решение *задачи* за конечное число шагов. Тогда конечное число отказов от предварительного пути прибавится к конечному числу шагов по алгоритму, гарантирующему решение *задачи* за конечное число шагов, и в результате мы получим, что *задача* будет решена за конечное число шагов.

Библиографические ссылки

1. Ahrikhencheikh C., Seireg A. Optimized-Motion Planning: Theory And Implementation. Chichester : John Wiley & Sons, 1994.

2. Principles of Robot Motion. Theory, Algorithms and Implementations / H. Choset [et al.]. Cambridge, Mass. : MIT Press, 2005.

3. LaValle S. M. Planning Algorithms. 1999–2006. URL: http://msl.uiuc.edu/planning (data of visit: 30.06.2011).

4. Canny J. The Complexity of Robot Motion Planning. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1988.

5. Collins G. E. Quantifier Elimination For Real Closed Fields By Cylindrical Algebraic Decomposition // Lecture Notes in Computer Sci. 1975. Vol. 33. P. 135–183.

6. Нильсон Н. Искусственный интеллект. М. : Мир, 1973.

7. Ильин В. А. Интеллектуальные роботы: теория и алгоритмы / Сиб. аэрокосмич. акад. – Красноярск, 1995.

8. Lumelsky V. J. Sensing, intelligence, motion. How robots and humans move in an unstructured world. N. Y. : John Wiley & Sons, 2006.

9. Chen C., Li H.-X., Dong D. Hybrid Control for Robot Navigation. A hierarchical Q-learning algorithm // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2008. Vol. 15. № 2. P. 37–47.

10. Online Algorithms with Discrete Visibility. Exploring Unknown Polygonal Environments / S. K. Ghosh, J. W. Burdick, A. Bhattacharya, S. Sarkar // IEEE Robotics & Automatiom Magazine. 2008. Vol. 15. № 2. P. 67–76.

11. Masehian E., Amin-Nasari M. R. Sensor-Based Robot Motion Planning. A Tabu Search Approach // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2008. Vol. 15. № 2. P. 48–57.

12. Rawlinson D., Jarvis R. Ways to Tell Robots Where to Go. Directing autonomous robots using topological instructions // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2008. Vol. 15. № 2. P. 27–36.

13. Yegenoglu F., Erkmen A. M., Stephanou H. E. On-line Path Planning Under Uncertainty // Proc. of 27th IEEE Conf. Decis. and Contr. Austin, Tex. Dec. 7–9. 1988. Vol. 2. P. 1075–1079.

14. Barraquand J., Latombe J.-C. Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach // Int. J. of Rob. Res. 1991. Vol. 10. № 6. P. 628–649.

P. K. Lopatin

ALGORITHM OF A MANIPULATING ROBOT MOVEMENT IN AN ENVIRONMENT WITH UNKNOWN OBSTACLES

An algorithm is presented for a manipulating robot (MR) control in an unknown static environment. A theorem is proved stating that following the algorithm the MR in a finite number of steps will either reach a target configuration or come to the proved conclusion that the target configuration may not be reached. Given sequences from the theorem facilitating the MR functioning in the unknown environment.

Keywords: robot, unknown environment, obstacles, reachability.

© Лопатин П. К., 2011

УДК 62.501

А. В. Медведев

ТЕОРИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. К-МОДЕЛИ

Рассматриваются некоторые задачи идентификации в «широком» смысле. Идентификация безынерционных объектов и объектов с памятью исследуется в условиях непараметрической априорной информации. Анализируется также случай, когда априорная информация соответствует как непараметрическому, так и параметрическому уровню одновременно. Это относится к системе многосвязных объектов. Приводятся непараметрические модели некоторых статических и динамических объектов с запаздыванием.

Ключевые слова: идентификация, априорная информация, идентификация в «широком», непараметрические модели, дискретно-непрерывные процессы, К-модели.

Теория – в виду практики.
Девиз конгрессов IFAC

При изучении неизвестных явлений можно
строить очень общие гипотезы и продвигаться
шаг за шагом с помощью опыта. Слишком
конкретная гипотеза почти наверняка заключает
в себе долю ошибки наряду с долей истины

П. Кюри

Проблема идентификации является одной из центральных в теории управления и других областях науки, объединяемых емким термином – кибернетика. Основное внимание мы уделим задачам идентификации в «широком» смысле, наряду с достаточно хорошо развитой теорией идентификации в «узком» смысле. Ранее [1–3] были описаны дискретно-непрерывные процессы и пути идентификации стохастических систем, которые тесно связаны с имеющейся априорной информацией.

Более того, нас будет интересовать прежде всего идентификация в условиях непараметрической неопределенности, а также случай, когда априорная информация соответствует одновременно как непараметрическому [3], так и параметрическому типу исходных данных об исследуемом процессе. Приведем достаточно общепринятую схему задачи идентификации (рис. 1) [4].

На рисунке приняты следующие обозначения: u_t, x_t – соответственно векторные входные и выходные переменные, контролируемые в дискретные моменты времени t; ξ_t – случайная ненаблюдаемая помеха; $\hat{x}_t$ – выходная величина настраиваемой модели; $\varepsilon_t = x_t - \hat{x}_t$; $Q(\varepsilon_t)$ – выпуклая функция потерь; α – вектор параметров настраиваемой модели; I_t – вектор всех наблюдений к моменту времени t; M – символ математического ожидания; $R(\alpha)$ – критерий идентификации.

Идентификация по данной схеме осуществляется при помощи настраиваемой модели (блок «модель») той или иной параметрической структуры, параметры α которой корректируются по мере поступления наблюдений «вход-выход». Обычно предполагается, что объект работает в стационарном режиме, т. е. вероятностные характеристики последовательностей $\vec{x}_s$, $\vec{u}_s$ неизменны во времени, $\vec{x}_s = (x_1, x_2, ..., x_s)$, $\vec{u}_s = (u_1, u_2, ..., u_s)$ – временные векторы. Соответствие настраиваемой модели объекту оценивается критерием качества идентификации:

$$R(\alpha) = M\left\{Q\left(\varepsilon\left(x_t, \hat{x}_t\right)\right)\right\}. \qquad (1)$$

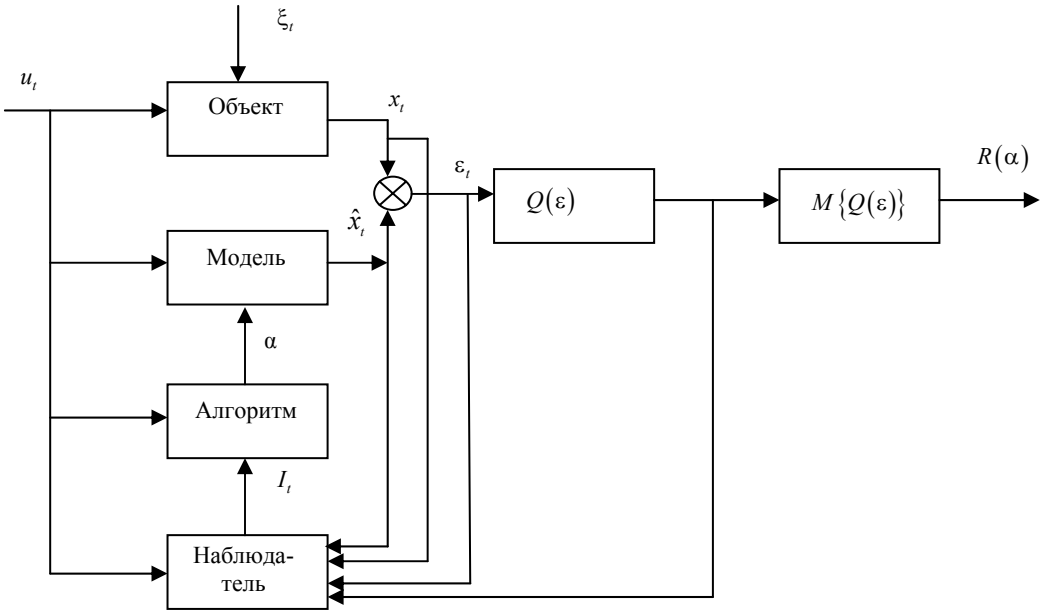


Рис. 1. Схема задачи идентификации

Алгоритм идентификации (блок «алгоритм») определяется параметрической структурой модели, видом функции потерь, методом минимизации критерия качества идентификации $R(\alpha)$ по α, т. е. нахождением такого α^*, что

$$R(\alpha^*) = \min_{\alpha} R(\alpha). \qquad (2)$$

Решение задачи (2) может быть получено, например, методом стохастических аппроксимаций, методом наименьших квадратов, методом случайного поиска и др.

Постановка задачи. Рассмотрим более общую схему дискретно-непрерывного объекта (рис. 2). Здесь приняты обозначения: $x(t)$ – векторная выходная переменная процесса; $u(t)$ – векторное управляющее воздействие; $\mu(t)$ – векторная входная переменная процесса; $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие; (t) – непрерывное время; H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{ω} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных; $\mu_t, u_t, x_t, \omega_t$ – означает измерение $\mu(t), u(t), x(t), \omega(t)$ в дискретное время t; $\omega^i(t)$: $i = 1, 2, ..., k$ – переменные процесса, контролируемые, в том числе, по длине объекта.

Отметим существенное отличие выходных переменных $z(t)$, $q(t)$ и $x(t)$, представленных на рис. 2. Выходная переменная $x(t)$, как и $\mu(t)$, $u(t)$, контролируется через интервалы времени Δt, $q(t)$ контролируется через существенно большие интервалы времени ΔT, $z(t)$ – через T ($T >> \Delta T >> \Delta t$).

С практической точки зрения для исследуемого процесса наиболее важным часто является контроль переменных $z(t)$. Например, выходные переменные $x(t)$ контролируются с помощью различного рода индукционных, емкостных и других датчиков, доступных электрическому измерению, $q(t)$ – на основе лабораторных анализов, а $z(t)$ – в результате длительного химического анализа, физико-механических испытаний и др. Этим и обусловлено существенное различие дискретности контроля выходных переменных $q(t)$ и $z(t)$. Особенностью здесь является то, что измеренное значение выхода объекта станет известным только через определенные промежутки времени, этим объясняется запаздывание в измерениях выходных переменных объекта $x(t)$, $q(t)$ и $z(t)$, а Δt, ΔT и T – дискретность, с которой происходят измерения.

В этом случае выходные переменные, как и ранее, зависят от входных $u(t)$, $\mu(t)$, $\xi(t)$, а $\omega(t)$ играет роль дополнительной информации, и тогда процесс описывается следующим образом:

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \xi(t), t). \qquad (4)$$

Достаточно подробный анализ такого процесса был проведен в [1; 2]. Конкретные задачи идентификации будут ниже приведены с указанием различий в каждом рассматриваемом случае. Из рис. 2 ясно, что значения выходных переменных $x(t)$, $q(t)$, $z(t)$ объекта зависят от входных $u(t)$, $\mu(t)$, $\xi(t)$. Полученные $\omega(t)$ представляют дополнительную информацию о протекании исследуемого процесса, которую целесообразно использовать при построении модели.

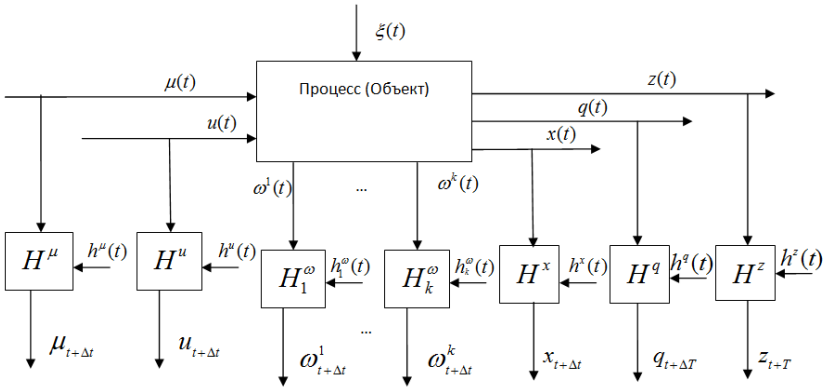


Рис. 2. Общая схема многомерного стохастического процесса

Таким образом, основная задача идентификации состоит в построении моделей, которые в достаточно общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$\hat{x}(t) = \hat{A}\left(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau)\right), \quad (5)$$

$$\hat{q}(t) = \hat{A}\left(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \hat{x}(t)\right), \quad (6)$$

$$\hat{z}(t) = \hat{A}\left(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \omega(t-\tau), \hat{x}(t), \hat{q}(t)\right), \quad (7)$$

где τ – запаздывание, отличающееся по различным каналам (из соображений простоты принято единообразное обозначение).

Многообразие задач идентификации будет обусловлено различными объемами априорной информации, типами процессов, наличием запаздывания в объекте и каналах связи.

H-модели безынерционных объектов. Сделаем следующие допущения: объект, представленный на рис. 2, – безынерционный, переменные $\omega(t) = \left(\omega'(t), ..., \omega^k(t)\right)$, $q(t)$, $z(t)$ отсутствуют вместе со своими каналами измерения. В этом случае объект описывается зависимостью

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \xi(t), t). \quad (8)$$

Примем, что модель такого объекта с запаздыванием имеет вид

$$\hat{x}(t) = \hat{A}(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \alpha), \quad (9)$$

где $\hat{A}$ – выбранный класс функций; α – вектор параметров; τ – запаздывание.

Запаздывания по различным каналам связи, конечно же, могут быть различными, но мы не будем это отмечать в формулах, чтобы не перегружать их индексами. Отметим лишь, что все запаздывания по соответствующим каналам связи известны.

Рассмотрим еще один процесс, часто имеющий место на практике [2]. Сущность его состоит в том, что из-за стохастической зависимости компонент вектора входных переменных, которая почти всегда неизвестна, исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру. Пусть $u \in R^1$, $\mu \in R^1$, $x \in R^1$ (рис. 3). Интервалы изменения $(u, \mu, x) \in R^3$ всегда известны из практических соображений. Без нарушения общности выделим в R^3 единичный куб. Реально протекающий процесс же принадлежит подобласти $\Omega^H(u, \mu, x) \subset \Omega(u, \mu, x)$, которая никогда не известна.

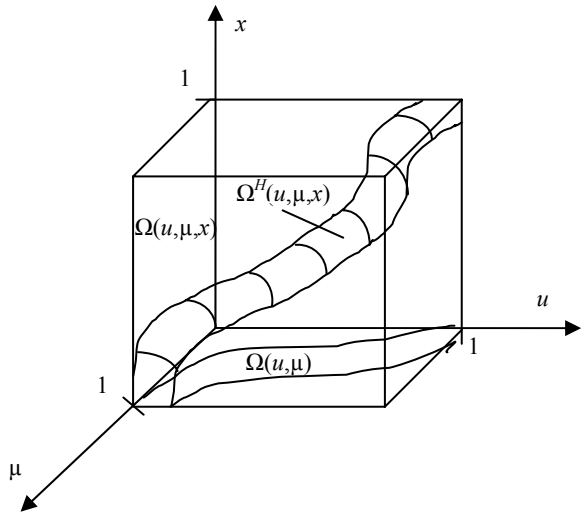


Рис. 3. Процесс, протекающий в трубке

Таким образом, $u \in [0;1]$, $\mu \in [0;1]$, $x \in [0;1]$, а триада $(u, \mu, x) \in \Omega(u, \mu, x)$. Ясно, что не каждое значение триады (u, μ, x), полученной в эксперименте или измеренной на реальном процессе, будет принадлежать $\Omega^H(u, \mu, x)$. Следует отметить, что в теории идентификации области $\Omega(u, \mu, x)$, $\Omega(u, \mu)$, $\Omega(u)$, $\Omega(\mu)$, $\Omega(x)$ всегда известны, а область $\Omega^H(u, \mu, x)$ всегда неизвестна. В случае стохастической независимости входных переменных процесса $\Omega^H(u, \mu, x)$ совпадает с $\Omega(u, \mu, x)$, т. е. $\Omega^H(u, \mu, x) = \Omega(u, \mu, x)$. Если объект динамический, то переменные фазового

пространства обязательно стохастически зависимы. Это, безусловно, накладывает отпечаток и на особенности моделирования подобных процессов, которые мы рассмотрим в дальнейшем.

Параметрическая модель статического процесса (см. рис. 1) может быть принята в виде [3; 4]

$$\hat{x}(u,\mu) = F(u,\mu,\alpha), \quad (10)$$

где $F(\cdot)$ – некоторая функция; α – вектор параметров, например,

$$\hat{x}(u,\mu) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \varphi_i(u,\mu), \quad (11)$$

где $\varphi_i, i = \overline{1,N}$ – система линейно-независимых функций; $(u,\mu) \in \Omega(u,\mu)$, $(u,\mu,x) \in \Omega(u,\mu,x)$. В случае стохастической зависимости компонент векторов $u \in R^n$, $\mu \in R^m$ исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру [1]. Тогда параметрическая модель должна быть взята в виде

$$\hat{x}(u,\mu) = F(u,\mu,\alpha) I(u,\mu), \quad (12)$$

где $I(u,\mu)$ – индикатор такой, что

$$I(u,\mu) = \begin{cases} 1, & \text{if } (u,\mu) \in \Omega^H(u,\mu) \subset \Omega(u,\mu), \\ 0, & \text{if } (u,\mu) \notin \Omega^H(u,\mu). \end{cases}$$

Ясно, что, если $\Omega^H(u,\mu) = \Omega(u,\mu)$, то модель (12) совпадает с обычными моделями (10) либо (11). В качестве оценки индикаторной функции $I(u,\mu)$ может быть принята статистика:

$$I_s(u,\mu) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{n}\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{m}\Phi\left(\frac{\mu_i - \mu_j^i}{c_s}\right) > 0, \\ 0, & \text{if } \sum_{i=1}^{s}\prod_{j=1}^{n}\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s}\right)\prod_{j=1}^{m}\Phi\left(\frac{\mu_i - \mu_j^i}{c_s}\right) \le 0. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь колоколообразные функции $\Phi(\cdot)$ и параметр размытости c_s удовлетворяют условиям сходимости [3], $u \in R^n$, $\mu \in R^m$, $x \in \Omega(x) \subset R^e$.

КН-модели безынерционных объектов. Здесь примем те же предположения, что и ранее, тогда

$$\hat{x}_i(u(t),\mu(t)) = F_i(u(t-\tau),\mu(t-\tau)), \; i = \overline{1,l} \quad (14)$$

или в более общем виде

$$f_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t)\right) = 0, \; i = \overline{1,l}. \quad (15)$$

Здесь $F(\cdot)$ и $f(\cdot)$ – неизвестные функции, соответствующие тому или иному классу, индекс $\langle i\rangle$ указывает, что векторы u, μ, x в данном случае составные. Это значит, что $u^{\langle i\rangle}$, $\mu^{\langle i\rangle}$, $x^{\langle i\rangle}$, $i = \overline{1,l}$ составлены из различных наборов компонент соответствующих векторов $u = (u_1,...,u_n)$, $\mu = (\mu_1,...,\mu_m)$, $x = (x_1,...,x_e)$, т. е. $u^{\langle 1\rangle}$, например, отличен по составу от компонент вектора $u^{\langle 2\rangle}$. В частности, может иметь место следующее: $u^{\langle 1\rangle} = (u_1,u_3,u_4,u_7)$, а $u^{\langle 2\rangle} = (u_2,u_3,u_5,u_8,u_9)$. То же самое относится к векторам $\mu \in \Omega(\mu) \subset R^m$, к $x \in \Omega(x) \subset R^l$ и к последующим аналогичным обозначениям.

Пусть исследуемые процессы имеют «трубчатую» структуру, тогда модель (14) имеет вид

$$\hat{x}_i(u(t),\mu(t)) = \hat{F}_i(u(t-\tau),\mu(t-\tau)) I_s(u(t-\tau),\mu(t-\tau)), \quad (16)$$

где индикатор $I_s(\cdot)$ (в дальнейшем, при наличии индекса s, мы будем опускать в формулах временные векторы)

$$I_s(u(t-\tau),\mu(t-\tau)) = I_s(u(t-\tau),\mu(t-\tau),\vec{u}_s,\vec{\mu}_s), \quad (17)$$

такой, что

$$I_s(u(t-\tau),\mu(t-\tau)) = \begin{cases} 1, & if \; (u(t-\tau),\mu(t-\tau)) \in \Omega_s^H(u,\mu), \\ 0, & if \; (u(t-\tau),\mu(t-\tau)) \notin \Omega_s^H(u,\mu). \end{cases} \quad (18)$$

Модель процесса (15) будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{f}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t)\right) \times I_s^i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau)\right) = 0, \; i = \overline{1,l}, \quad (19)$$

где индикатор $I_s^i(\cdot)$ равен

$$I_s^i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),\vec{u}_s^{\langle i\rangle},\vec{\mu}_s^{\langle i\rangle}\right) = \begin{cases} 1, & \text{if } (u,\mu) \in \Omega_s^H(u,\mu), \\ 0, & \text{if } (u,\mu) \in \Omega_s^H(u,\mu). \end{cases} \quad (20)$$

Модели класса (16)–(20) будем называть КН-моделями безынерционных объектов с запаздыванием, поскольку они принципиально отличаются от общепринятых моделей [4; 5] не только потому, что описывают процессы «трубчатой» структуры, но и наличием априорной информации по различным каналам многомерного объекта как параметрического, так и непараметрического типа. Более конкретно модель подобного объекта может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{f}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t),\alpha\right) I_s^i = 0, \; i = \overline{1,k}, \\ \hat{S}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t),\vec{u}_s^{\langle i\rangle},\vec{\mu}_s^{\langle i\rangle},\vec{x}_s^{\langle i\rangle},\alpha\right) I_s^i = 0, \\ i = \overline{k+1,l}, \end{cases} \quad (21)$$

где α – вектор параметров; I_s^i, $i=\overline{1,k}$ – индикатор (20); $\hat{S}_i$, $i=\overline{\lambda+1,l}$ – соответствующие непараметрические статистики; $\hat{f}_i(\cdot)$, $i=\overline{1,\lambda}$ – семейство параметрических функций, определенных на основании априорной информации [3].

Система уравнений (21) представляет собой модель многомерного многосвязного безынерционного объекта с запаздыванием, который относятся к классу КН-моделей, принципиально отличающихся от известных [4; 5]. Их отличие состоит в том, что по отдельным каналам многомерного процесса известна его параметрическая структура с точностью до параметров α. Она может быть определена на основе фундаментальных законов физики, механики, электротехники и др.

Вторая группа уравнений (21) $\hat{S}_i$, $i=\overline{\lambda+1,l_1}$ соответствует уровню непараметрической неопределенности. В этом случае мы можем располагать априорной информацией лишь качественного характера об исследуемом объекте и используем стохастические аппроксимации непараметрического типа.

Оценка параметров α в λ-уравнениях (21) может быть сведена к задаче идентификации в «узком смысле». Оценка второй группы уравнений $\hat{S}_i$, $i=\overline{\lambda+1,l}$ в (21) может быть осуществлена непараметрическими методами [3]. Если система уравнений (21) распадается, т. е. в случае процесса, описываемого (14), то по известным значениям $u(t)$ и $\mu(t)$ можно легко дать прогноз $x(t+\tau)$, если же нет, тогда возникает необходимость решения системы (иначе, КН-модели) относительно вектора $x\in\Omega(x)\subset R^e$. В случае наличия одного корня системы (21) в $\Omega(x)$ возможно использовать прием, изложенный в [3]. Вообще говоря, этот вопрос требует специального исследования.

К-модели динамических объектов. Рассмотрим задачу построения модели динамического процесса (см. рис. 2). Отметим, что ΔT и T значительно превышают постоянную времени объекта по всем остальным каналам.

Без нарушения общности можно считать, что контроль переменных $u(t)$, $\mu(t)$, $\omega(t)$, $x(t)$ осуществляется через интервал времени $\Delta t << \Delta T << T$. Следовательно, процесс по каналам $q(t)$ и $z(t)$ относится к классу безынерционных с запаздыванием, а по каналам $\omega(t)$ и $x(t)$ может быть отнесен к классу динамических, так как их контроль осуществляется через интервал Δt значительно меньший, чем постоянная времени объекта по соответствующим каналам. В этом случае достаточно общая К-модель может быть принята в виде

$$\begin{cases} \hat{f}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),\omega^{\langle i\rangle}(t-\tau),\right. \\ \left. x^{\langle i\rangle}(t),\dfrac{dx^{\langle i\rangle}(t)}{dt},\dfrac{d^2x^{\langle i\rangle}(t)}{dt^2},...,\alpha\right)=0,\ \ i=\overline{1,k}; \\ \hat{f}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),\omega^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t),\right. \\ \left. q^{\langle i\rangle}(t),z^{\langle i\rangle}(t),\beta\right)I_s^i=0,\ \ i=\overline{k+1,l_1}; \\ \hat{S}_i\left(u^{\langle i\rangle}(t-\tau),\mu^{\langle i\rangle}(t-\tau),\omega^{\langle i\rangle}(t-\tau),x^{\langle i\rangle}(t),\right. \\ \left. q^{\langle i\rangle}(t),z^{\langle i\rangle}(t),W_s^{\langle i\rangle}\right)=0,\ \ i=\overline{l_1+1,l_2},\ \ l_2>l_1>l, \end{cases} \qquad (22)$$

где первая группа уравнений (22) найдена на основе известных фундаментальных законов, соответствующих исследуемому процессу с точностью до параметров α. Вторая группа уравнений объекта получена на основе имеющейся априорной информации с точностью до вектора параметров β. Третья группа уравнений (22) не известна с точностью до параметров, но класс функций, характеризующих взаимосвязь «входных-выходных» и промежуточных переменных, определен на основе априорной информации. Фигурирующее в ней обозначение $W_s^{\langle i\rangle}$ представляет собой совокупность всех *i*-х наблюдений переменных объемом s, т. е.

$$W_s^{\langle i\rangle}=\left(\overrightarrow{u_s^{\langle i\rangle}},\overrightarrow{\mu_s^{\langle i\rangle}},\overrightarrow{\omega_s^{\langle i\rangle}},\overrightarrow{x_s^{\langle i\rangle}},\overrightarrow{q_s^{\langle i\rangle}},\overrightarrow{z_s^{\langle i\rangle}}\right),\ \ i=\overline{l_1+1,l_2}\ .$$

Оценка значений компонент векторов выходных переменных $x(t),q(t),z(t)$ может быть найдена в результате решения системы уравнений (22) при фиксированных значениях $u(t),\mu(t),\omega(t)$. К-модели принципиально отличаются от общепринятых прежде всего тем, что учитывают во взаимосвязи все имеющиеся переменные и связи между ними в ситуации, когда дискретность контроля последних существенно различаются. Отличаются также и уровни априорной информации о различных каналах исследуемого процесса. Таким образом, К-модели представляют собой органический синтез, описывающий исследуемый процесс или систему взаимосвязанных объектов во всем их многообразии.

Основное содержание вышесказанного состоит в следующем. Во-первых, постановка задачи идентификации чаще всего должна осуществляться в условиях, когда частично мы находимся в условиях и параметрической, и непараметрической неопределенности. Это соответствует одновременно идентификации в «узком» и «широком» смыслах. Именно практика диктует нам требования, когда необходимо строить К-модели, – такова реальность. Во-вторых, при формулировке задачи идентификации необходимо обязательно учитывать имеющиеся средства контроля,

дискретность измерения переменных, характеризующих состояние исследуемого процесса, случайные ошибки, непредставительность выборок, действие случайных возмущений и т. д. И, наконец, в-третьих, чаще всего мы лишены на практике возможности проводить желаемые эксперименты, потому что объекты «включены» в реально функционирующий производственный процесс. Необходимо с большой осторожностью на этапе математической постановки задачи произносить ставшие обычными допущения: «Пусть объект описывается…», «Имеем генеральную совокупность» и т. п. Только учет всех перечисленных выше факторов позволяет строить качественные модели реальных дискретно-непрерывных процессов и использовать их в дальнейшем для целей управления.

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3. С. 4–9.

2. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4. С. 4–9.

3. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.

4. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984.

5. Методы классической и современной теории автоматического управления : в 2 т. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : Изд. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2004.

A. V. Medvedev

THEORY OF NON-PARAMETRIC SYSTEMS. K-MODELS

Some problems of identification in a wide sense are considered in the paper. Identification of intertia-free objects and objects with mamory are investigated in condition of non-parametric a priory information. A case when a priory information corresponds either non-parametric level simultaneously is researched. It belongs to the system of multiply connected objects. Non-parametric models of some static and dynamic objects wuth delay are given.

Keywords: identification, a priory information, identification in "wide", non-parametric models, discrete-continuous processes, K-models.

© Медведев А. В., 2011

УДК 519.872

А. А. Назаров, Е. А. Судыко

НЕЭРГОДИЧНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА

Рассмотрена математическая модель компьютерной сети случайного доступа с конфликтами заявок, при возникновении которых обе заявки переходят в источник повторных вызовов. Для процесса изменения состояний системы построена вложенная цепь Маркова. Сформулирована теорема о неэргодичности цепи Маркова, что доказывает неустойчивость функционирования рассматриваемой компьютерной сети связи, управляемой протоколом случайного множественного доступа.

Ключевые слова: теория массового обслуживания, RQ-системы, конфликты заявок.

Рассмотрим сеть связи случайного доступа. Обращение к общему ресурсу (моноканалу) реализуется протоколом случайного множественного доступа с оповещением о конфликте. Абонентская станция, сформировав сообщение, отправляет его на общий ресурс. Если ресурс свободен, то начинает осуществляться немедленная передача сообщения, которая заканчивается успешно, если за это время другие заявки не поступали. Если же за время передачи одного сообщения поступает другое, то происходит наложение сигналов, в результате чего сообщения искажаются. Сообщения, попавшие в конфликт, а также поступившие на этапе оповещения о конфликте, считаются искаженными и переходят в источник повторных вызовов (ИПВ), откуда вновь подаются на обслуживание после случайной задержки.

В качестве математической модели сети случайного доступа рассмотрим (см. рисунок) однолинейную немарковскую RQ-систему (Retrial Queues) с конфликтами заявок, на вход которой поступает простейший поток заявок с интенсивностью λ. Требование, обратившееся к прибору и заставшее его свободным, немедленно занимает прибор и начинает обслуживаться в течение случайного времени, имеющего произвольную функцию распределения $B(x)$. Если за время обслуживания заявки другие требования не поступали, то обслуживаемая заявка покидает систему после полного завершения обслуживания. Если

прибор занят, то поступившая и обслуживаемая заявки вступают в конфликт и обе переходят в ИПВ, где осуществляют случайную задержку, продолжительность которой имеет экспоненциальное распределение с параметром σ, а на приборе начинается этап оповещения о конфликте, продолжительность которого имеет функцию распределения $A(x)$. Из ИПВ после случайной задержки заявка вновь обращается к прибору с повторной попыткой его захвата. И если прибор свободен, то заявка из ИПВ немедленно занимает его для обслуживания. Если же прибор занят, то вновь возникает конфликт и обе заявки переходят в ИПВ.

Таким образом, математической моделью сети случайного доступа будем называть RQ-систему с конфликтами заявок и оповещением о конфликте.

Важным вопросом в теории массового обслуживания является определение условий существования стационарного режима в RQ-системах. Несмотря на обилие работ [1; 2], посвященных данному вопросу, проблема эргодичности RQ-систем с конфликтами заявок не нашла должного отражения в научной литературе. В работе мы использовали условие Каплана и теорему Сеннота [3] для доказательства неэргодичности математических моделей компьютерных сетей связи с конфликтами заявок.

Неэргодичность математической модели определяет неустойчивость функционирования рассматриваемой компьютерной сети связи, управляемой протоколом случайного множественного доступа.

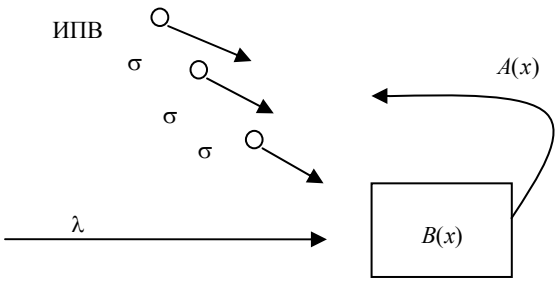


Схема функционирования немарковской RQ-системы

Введем обозначение $i(t)$ – число заявок в ИПВ в момент времени t.

Так как случайный процесс $i(t)$ для рассматриваемой RQ-системы является полумарковским, а эргодические свойства полумарковского процесса полностью определяются эргодическими свойствами его вложенной цепи Маркова, то для рассматриваемого процесса $i(t)$ определим его вложенную цепь и выполним исследование ее эргодических свойств.

Рассмотрим моменты времени

$$t_1 < t_2 < t_3 < \ldots < t_n < t_{n+1} < \ldots,$$

где t_n – момент окончания режима функционирования прибора завершением обслуживания или этапа оповещения о конфликте, и освобождением прибора; тогда процесс $\nu_n = i(t_n)$ с дискретным временем n является вложенной цепью Маркова для полумарковского процесса $i(t)$.

Найдем переходные вероятности $P_{ij} = P\{\nu_{n+1} = j \mid \nu_n = i\}$ вложенной цепи Маркова ν_n.

За один шаг возможны следующие переходы цепи Маркова из состояния $\nu_n = i$ в состояния $\nu_{n+1} = j$, где $j = \{i-1, i, i+1, i+2, i+3, i+4, \ldots\}$. Определим события, соответствующие этим переходам:

– $i \to i-1$: на прибор поступила заявка из ИПВ, обслуживание которой завершилось успешно;

– $i \to i$: на прибор поступила заявка из внешнего потока, обслуживание которой завершилось успешно; или на прибор поступила заявка из ИПВ, но ее обслуживание прервалось заявкой из ИПВ, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого других заявок из внешнего потока не поступало;

– $i \to i+1$: на прибор поступила заявка из внешнего потока, ее обслуживание прервалось заявкой из ИПВ, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого других заявок из внешнего потока не поступало; или на прибор поступила заявка из ИПВ, ее обслуживание прервано заявкой из внешнего потока, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого других заявок из внешнего потока не поступало; либо на прибор для обслуживания встала заявка из ИПВ, ее обслуживание прервалось заявкой из ИПВ, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого из внешнего потока поступила одна заявка;

– $i \to i+k$, $k = \overline{2,\infty}$: на прибор поступила заявка из внешнего потока, ее обслуживание прервано заявкой из внешнего потока, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого из внешнего потока поступило $k-2$ заявки; либо на прибор поступила заявка из внешнего потока, ее обслуживание прервалось заявкой из ИПВ, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого из внешнего потока поступила $k-1$ заявка; или на прибор поступила заявка из ИПВ, ее обслуживание прервано заявкой из внешнего потока, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого из внешнего потока поступала $k-1$ заявка; либо на прибор поступила заявка из ИПВ, ее обслуживание прервалось заявкой из ИПВ, произошел конфликт и на приборе начался этап оповещения о конфликте, за время которого из внешнего потока поступило k заявок.

Пусть $P\{\Delta_n = k \mid x\} = \dfrac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x}$ – условная вероятность того, что на интервале оповещения о конфликте поступит k заявок при условии, что средняя продолжительность этапа оповещения о конфликте равна x [4].

Так как x есть значение случайной величины с функцией распределения $A(x)$, то усредняя по x, получим значение безусловных вероятностей

$$f(k) = \int_0^\infty \frac{(\lambda x)^k}{k!} e^{-\lambda x} dA(x).$$

Тогда, учитывая описание модели, запишем вероятности P_{ij} переходов цепи Маркова ν_n в виде

$$P_{ii-1} = \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma} B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right),$$

$$P_{ii} = \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{(i-1)\sigma}{\lambda + (i-1)\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right] \times$$

$$\times f(0) + \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma} B^*\left(\lambda + i\sigma\right);$$

$$P_{ii+1} = \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + i\sigma\right)\right] f(0) +$$

$$+ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{\lambda}{\lambda + (i-1)\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right] f(0) +$$

$$+ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{(i-1)\sigma}{\lambda + (i-1)\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right] f(1);$$

$$P_{ii+k} = \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + i\sigma\right)\right] f(k-1) +$$

$$+ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{\lambda}{\lambda + (i-1)\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right] f(k-1) +$$

$$+ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{(i-1)\sigma}{\lambda + (i-1)\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right] f(k) +$$

$$+ \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\left[1 - B^*\left(\lambda + i\sigma\right)\right] f(k-2); \quad (1)$$

$$\sum_{k=-1}^{\infty} P_{ii+k} = 1, \quad (2)$$

где (2) – условие нормировки, а $B^*\left(\alpha\right) = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x} dB\left(x\right)$ – преобразование Лапласа–Стилтьеса функции распределения $B(x)$.

Таким образом, в явном виде записаны значения переходных вероятностей P_{ij} для вложенной цепи Маркова ν_n.

Применяя условие Каплана и теорему Сеннота, найдем условия неэргодичности построенной цепи Маркова.

Обозначим

$$\varphi_i(z) = \frac{z^i - \sum_j P_{ij} z^j}{1 - z}, \quad (3)$$

$$\gamma_i = \sum_{j=0}^{\infty} \left(j - i\right) P_{ij}. \quad (4)$$

Условие Каплана. Если существует положительная константа B, положительное целое число N, и $0 \le z < 1$, такое, что

$$\varphi_i(z) \ge -B \quad (5)$$

для всех $i > N$ и $c \le z < 1$, то будем говорить, что выполнено условие Каплана (5).

Теорема Сеннота. Если для цепи Маркова выполняются условия Каплана (5), $\gamma_i < \infty \quad (i \ge 0)$ и существует такое N, что

$$\gamma_i \ge 0 \quad (i \ge N), \quad (6)$$

тогда цепь Маркова неэргодична.

Обозначим b – среднее значение времени обслуживания в рассматриваемой RQ-системе, т. е.

$$b = \int_0^{\infty} x\, dB(x), \quad (7)$$

а a – среднее значение продолжительности этапа оповещения о конфликте в рассматриваемой RQ-системе, т. е.

$$a = \int_0^{\infty} x\, dA(x). \quad (8)$$

Отметим свойство преобразования Лапласа–Стилтьеса $B^*\left(\alpha\right)$, заключающееся в выполнении предельного равенства

$$\lim_{\alpha \to \infty} \alpha B^*\left(\alpha\right) = B'\left(0\right), \quad (9)$$

где величина $B'\left(0\right) = B'\left(x\right)\big|_{x=0}$ – значение производной в нуле от функции распределения $B(x)$.

Докажем следующее утверждение.

Теорема 1. Цепь Маркова, переходные вероятности которой определяются равенствами (1), является неэргодической при любых значениях загрузки $\rho = \lambda b > 0$.

Доказательство. Неравенство (5), сформулированное в условии Каплана, перепишем в виде

$$\varphi_i(z) = z^i - \sum_j P_{ij} z^j \ge -\left(1 - z\right) B. \quad (10)$$

Найдем предельные при $i \to \infty$ значения коэффициентов при степенях z:

$$\lim_{i \to \infty} P_{ii-1} = 0, \quad \lim_{i \to \infty} P_{ii+k} = f(k), \quad k = \overline{0, \infty}. \quad (11)$$

Тогда, учитывая предельные неравенства (11) при $i \to \infty$, неравенство (10) примет вид

$$0 \ge -\left(1 - z\right) B, \quad (12)$$

который выполняется для любых значений $c \le z < 1$ и значений параметров системы, в том числе и для любых значений параметра ρ.

Перепишем неравенство (6), сформулированное в теореме Сеннота, в следующем виде:

$$\sum_{j=0}^{\infty} (j - i) P_{ij} = -\frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma} B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right) +$$

$$+ \sum_{k=0}^{\infty} k \left\{ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{(i-1)\sigma}{\lambda + (i-1)\sigma}\left\{1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right\} \times \right.$$

$$\times f(k) + \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma} \times \left\{1 - B^*\left(\lambda + i\sigma\right)\right\} f(k-1) + \quad (13)$$

$$+ \frac{i\sigma}{\lambda + i\sigma}\frac{\lambda}{\lambda + (i-1)\sigma}\left\{1 - B^*\left(\lambda + (i-1)\sigma\right)\right\} f(k-1) +$$

$$\left. + \frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\frac{\lambda}{\lambda + i\sigma}\left\{1 - B^*\left(\lambda + i\sigma\right)\right\} f(k-2) \right\} > 0.$$

Найдем предел при $i \to \infty$ выражения (13), учитывая свойство преобразования Лапласа–Стилтьеса (9), получим неравенство

$$\lim_{i\to\infty}\sum_{j=0}^{\infty}(j-i)P_{ij} = \lambda\int_0^{\infty} x\,dA(x) = \lambda\,a > 0\,, \qquad (14)$$

которое выполняется для любых значений параметров системы, в том числе и для любых значений параметра ρ.

Из выполнения предельных неравенств (12) и (14) следует существование такого натурального числа i_0, что для всех $i > i_0$ выполняются допредельные неравенства (10) и (13).

Таким образом, выполнение условия Каплана и теоремы Сеннота доказывает сформулированную теорему.

Теорема доказана.

Итак, в немарковской RQ-системе с конфликтами заявок и оповещением о конфликте стационарного режима не существует при любых значениях ρ, что доказывает неустойчивое функционирование рассматриваемой компьютерной сети случайного доступа.

Библиографические ссылки

1. Artalejo J. R., Dudin A. N., Klimenok V. I. Stationary analysis of a retrial queue with preemptive repeated attempts // Operations Research Letters. 2001. № 28(4). P. 173–180.

2. Kernane T. Conditions for stability and instability of retrial queueing systems with general retrial times // Statistics and Probability Letters. 2008. № 78. P. 3244–3248.

3. Sennot L. I., Humblet P. A., Tweedie R. L. Mean drifts and the non-ergodicity of Markov chains // Operations research. 1983. № 31(4). P. 783–789.

4. Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Теория массового обслуживания : учеб. пособие. Томск : Изд-во науч.-тех. лит., 2004.

A. A. Nazarov, E. A. Sudyko

NONERGODICITY OF MATHEMATIC MODEL OF A RANDOM ACCESS NETWORK

We have considered a random access communication network with conflicts of requests, which mean that the arriving request and request under service are sent to a retrial pool. For a process of system states changing the embedded Markov chain is built up. The theorem on non-ergodicity of Markov chain, which proves the instability of functioning of the computer communication network managed by a random multiple access, is formulated.

Keywords: mass service theory, RQ-systems, conflicts of requests.

© Назаров А. А., Судыко Е. А., 2011

УДК 519.622

Е. А. Новиков

РАЗРАБОТКА (4,2)-МЕТОДА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЖЕСТКИХ ЗАДАЧ*

Получены коэффициенты L-устойчивого (4,2)*-метода третьего порядка точности для решения жестких задач. Построено неравенство для контроля точности вычислений. Проведены расчеты, подтверждающие работоспособность и эффективность алгоритма переменного шага.*

Ключевые слова: жесткая задача, (m,k)-метод, контроль точности.

При моделировании динамических процессов в электрических сетях, радиоэлектронике, химической кинетике и других важных приложениях возникает необходимость численного решения задачи Коши для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений [1; 2]. Стремление к все более точному описанию физических процессов приводит к росту размерности и жесткости соответствующей системы уравнений. В этом случае эффективность алгоритмов интегрирования существенно зависит от свойств устойчивости численной формулы [3; 4]. Здесь получены коэффициенты *L*-устойчивого (4,2)-метода третьего порядка точности для численного решения жестких задач.

Класс (*m*,*k*)-методов. Рассмотрим задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$y' = f(y),\ y(t_0) = y_0,\ \ t_0 \le t \le t_k\,, \qquad (1)$$

где y и f − вещественные N-мерные вектор-функции; t − независимая переменная. Ниже будем предполагать, что задача (1) жесткая.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00106).

Зададимся значениями целых чисел m и k, $k \le m$ и введем в рассмотрение следующие множества:

$$M_m = \{1, 2, ..., m\},$$
$$M_k = \{m_i \in M_m \mid 1 = m_1 < m_2 < \cdots < m_k \le m\},$$
$$M_{m-k} = M_m \setminus M_k,$$
$$J_i = \{m_{j-1} \in M_m \mid j > 1, m_j \in M_k, m_j \le i\},\ 2 \le i \le m.$$

Для решения задачи (1) будем применять (m,k)-схемы вида [5]

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^{m} p_i k_i,\ D_n = E - ahf_n',$$
$$D_n k_i = hf\Big(y_n + \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} k_j\Big) + \sum_{j \in J_i} \alpha_{ij} k_j,\ i \in M_k, \qquad (2)$$
$$D_n k_i = k_{i-1} + \sum_{j \in J_i} \alpha_{ij} k_j,\ i \in M_{m-k}.$$

Здесь E – единичная матрица; $f_n' = \partial f(y_n)/\partial y$ – матрица Якоби системы (1); h – шаг интегрирования; a, p_i, α_{ij} и β_{ij} – вещественные константы, определяющие свойства точности и устойчивости методов (2). В отличие о других известных одношаговых численных схем, в (m, k)-методах правая часть задачи (1) вычисляется не для всех стадий. За счет этого значительно упрощается проблема замораживания матрицы Якоби, т. е. проблема использования одной матрицы D_n на нескольких шагах интегрирования. Для описания традиционных одношаговых методов достаточно одной константы m (число стадий). В данных схемах для описания затрат на шаг необходимо введение двух постоянных m и k. Вычислительные затраты на шаг интегрирования в методах (2) следующие: один раз вычисляется матрица Якоби и осуществляется декомпозиция матрицы D_n, k раз вычисляется функция f и m раз осуществляется обратный ход метода Гаусса.

Устойчивость численных методов обычно исследуют на скалярной тестовой задаче

$$y' = \lambda y,\ \ y(t_0) = y_0,\ t \ge 0,$$

где λ – произвольное комплексное число, $\mathrm{Re}(\lambda) < 0$. Применяя численную схему (2) для решения данной задачи, имеем $y_{n+1} = Q(x)y_n$, $x = h\lambda$. Схема называется устойчивой при $x = h\lambda$, если $|Q(x)| \le 1$. Область R комплексной плоскости называется областью устойчивости схемы, если она устойчива в каждой точке области. Схема называется A-устойчивой, если ее область устойчивости включает всю полуплоскость $\mathrm{Re}(h\lambda) < 0$. Схема называется L-устойчивой, если она A-устойчива и $|Q(h\lambda)| \to 0$ при $\mathrm{Re}(h\lambda) \to -\infty$.

Максимальный порядок (m,2)-методов. Рассмотрим (m,2)-схемы следующего вида:

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^{m} p_i k_i,\ D_n = E - ahf_n',$$
$$D_n k_1 = hf(y_n),\ D_n k_i = k_{i-1},\ 2 \le i \le s_1 - 1, \qquad (3)$$
$$D_n k_{s_1} = hf\Big(y_n + \sum_{j=1}^{s_1-1} \beta_{s_1,j} k_j\Big) + \alpha_{s_1,s_1-1} k_{s_1-1},$$
$$D_n k_i = k_{i-1} + \alpha_{i,s_1-1} k_{s_1-1},\ \ s_1 + 1 \le i \le m,$$

где m и s_1, $s_1 \le m$ – произвольные целые постоянные. Нетрудно видеть, что схемы (3) описывают всевозможные варианты (m,2)-методов.

Теорема. При любом выборе множеств M_k и J_i и при любом m нельзя построить (m,2)-метод выше четвертого порядка.

Без потери общности для простоты доказательство проведем для скалярной задачи (1), точное решение $y(t_{n+1})$ которой можно записать в виде

$$y(t_{n+1}) = y(t_n) + hf + \frac{1}{2}h^2 ff' + \frac{1}{6}h^3[f'^2 f + f''f^2] +$$
$$+\frac{1}{24}h^4[f'^3 f + 4ff'f''f^2 + f'''f^3] + \frac{1}{120}h^5[f'^4 f + 4ff'^2 f''f^3 +$$
$$+5f'^2 f''f^2 + f''^2 f^3 + f^{IV} f^4] + O(h^6),$$

где элементарные дифференциалы вычислены на точном решении $y(t_n)$. Учитывая, что ряд Тейлора для D_n^{-1} имеет вид

$$D_n^{-1} = E + ahf_n' + a^2 h^2 f_n'^2 + a^3 h^3 f_n'^3 + \ldots,$$

получим, что второе вычисление функции $f(y_{n,c})$ будет осуществляться в точке

$$y_{n,c} = y_n + \sum_{j=1}^{s_1-1} \beta_{s_1,j} k_j =$$
$$= y_n + \sum_{i=1}^{4} c_i h^i f_n'^{(i-1)} f_n + O(h^5),$$

где числа c_i, $1 \le i \le 4$ определяются через коэффициенты схемы (3), а элементарные дифференциалы вычислены на приближенном решении y_n. Учитывая ряд для точного решения $y(t_{n+1})$, для доказательства теоремы достаточно показать, что в представлении функции $f(y_{n,c})$ в виде ряда Тейлора по степеням h не содержится слагаемое $h^5 f_n''^2 f_n^3$. Разлагая $f(y_{n,c})$ в ряд Тейлора в окрестности точки y_n до членов с h^5 включительно, имеем

$$f(y_{n,c}) = hf_n + c_1 h^2 f_n' f_n + h^3[c_2 f_n'^2 f_n +$$
$$+\frac{1}{2}f_n'' f_n^2] + h^4[c_3 f_n'^3 f_n + c_1 c_2 f_n' f_n'' f_n^2 +$$
$$+\frac{1}{6}c_1^3 f_n''' f_n^3] + h^5[c_4 f_n'^4 f_n + c_1 c_3 f_n'^2 f_n'' f_n^2 +$$
$$+\frac{1}{2}c_1^2 c_2 f_n' f_n''' f_n^3 + \frac{1}{24}c_1^4 f_n^{IV} f_n^4] + O(h^6),$$

что завершает доказательство.

Исследование (4,2)-метода. Для решения задачи (1) рассмотрим численную формулу

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^{4} p_i k_i,\ D_n = E - ahf_n',$$
$$D_n k_1 = hf(y_n),\ D_n k_2 = k_1, \qquad (4)$$
$$D_n k_3 = hf(\tilde{y}_{n+1}) + \alpha_{32} k_2,\ D_n k_4 = k_3 + \alpha_{42} k_2,$$

где схему

$$\tilde{y}_{n+1} = y_n + \beta_{31} k_1 + \beta_{32} k_2 \qquad (5)$$

называют внутренней схемой метода (4).

Для построения численной формулы третьего порядка точности разложим стадии k_i, $1 \le i \le 4$ в ряды Тейлора в окрестности точки y_n, т. е.

$$k_1 = hf_n + ah^2 f_n' f_n + a^2 h^3 f_n'^2 f_n + a^3 h^4 f_n'^3 f_n + O(h^5),$$

$$k_2 = hf_n + 2ah^2 f_n' f_n + 3a^2 h^3 f_n'^2 f_n + 4a^3 h^4 f_n'^3 f_n + O(h^5),$$

$$k_3 = (1+\alpha_{32})hf_n + (a + 3a\alpha_{32} + \beta_{31} + \beta_{32})h^2 f_n' f_n + (a^2 + 6a^2\alpha_{32} + 2a\beta_{31} + 3a\beta_{32})h^3 f_n'^2 f_n + \frac{1}{2}(\beta_{31}+\beta_{32})^2 h^3 f_n'' f_n^2 + (a^3 + 10a^3\alpha_{32} + 3a^2\beta_{31} + 6a^2\beta_{32})h^4 f_n'^3 f_n + \frac{1}{2}a(\beta_{31}+\beta_{32})^2 h^4 f_n' f_n'' f_n^2 + a(\beta_{31}+\beta_{32})(\beta_{31}+2\beta_{32})h^4 f_n'' f_n' f_n^2 + \frac{1}{6}(\beta_{31}+\beta_{32})^3 h^4 f_n''' f_n^3 + O(h^5), \quad (6)$$

$$k_4 = (1+\alpha_{32}+\alpha_{42})hf_n + (2a + 4a\alpha_{32} + 3a\alpha_{42} + \beta_{31} + \beta_{32})h^2 f_n' f_n + (3a^2 + 10a^2\alpha_{32} + 6a^2\alpha_{42} + 3a\beta_{31} + 4a\beta_{32})h^3 f_n'^2 f_n + \frac{1}{2}(\beta_{31}+\beta_{32})^2 h^3 f_n'' f_n^2 + (4a^3 + 20a^3\alpha_{32} + 10a^3\alpha_{42} + 6a^2\beta_{31} + 10a^2\beta_{32})h^4 f_n'^3 f_n + a(\beta_{31}+\beta_{32})^2 h^4 f_n' f_n'' f_n^2 + a(\beta_{31}+\beta_{32})(\beta_{31}+2\beta_{32})h^4 f_n'' f_n' f_n^2 + \frac{1}{6}(\beta_{31}+\beta_{32})^3 h^4 f_n''' f_n^3 + O(h^5).$$

Подставим разложения стадий (6) в первую формулу (4). В результате запишем

$$y_{n+1} = y_n + [p_1 + p_2 + (1+\alpha_{32})p_3 + (1+\alpha_{32}+\alpha_{42})p_4]hf_n + [ap_1 + 2ap_2 + (a + 3a\alpha_{32} + \beta_{31} + \beta_{32})p_3 + (2a + 4a\alpha_{32} + 3a\alpha_{42} + \beta_{31} + \beta_{32})p_4]h^2 f_n' f_n + [a^2 p_1 + 3a^2 p_2 + (a^2 + 6a^2\alpha_{32} + 2a\beta_{31} + 3a\beta_{32})p_3 + (3a^2 + 10a^2\alpha_{32} + 6a^2\alpha_{42} + 3a\beta_{31} + 4a\beta_{32})p_4]h^3 f_n'^2 f_n + \frac{1}{2}(p_3+p_4)(\beta_{31}+\beta_{32})^2 h^3 f_n'' f_n^2 + [a^3 p_1 + 4a^3 p_2 + (a^3 + 10a^3\alpha_{32} + 3a^2\beta_{31} + 6a^2\beta_{32})p_3 + (4a^3 + 20a^3\alpha_{32} + 10a^3\alpha_{42} + 6a^2\beta_{31} + 10a^2\beta_{32})p_4]h^4 f_n'^3 f_n + \frac{1}{2}a(\beta_{31}+\beta_{32})^2(p_3+2p_4)h^4 f_n' f_n'' f_n^2 + a(p_3+p_4)(\beta_{31}+\beta_{32})(\beta_{31}+2\beta_{32})h^4 f_n'' f_n' f_n^2 + \frac{1}{6}(\beta_{31}+\beta_{32})^3(p_3+p_4)h^4 f_n''' f_n^3 + O(h^5). \quad (7)$$

Условия порядка. Сравним полученное соотношение (7) с разложением точного решения $y(t_{n+1})$ в ряд Тейлора в окрестности точки t_n до членов с h^3 включительно. В результате получим условия третьего порядка точности схемы (4), которые имеют вид

$$p_1 + p_2 + (1+\alpha_{32})p_3 + (1+\alpha_{32}+\alpha_{42})p_4 = 1,$$

$$ap_1 + 2ap_2 + (a+\beta_{31}+\beta_{32}+3a\alpha_{32})p_3 + (2a+\beta_{31}+\beta_{32}+4a\alpha_{32}+3a\alpha_{42})p_4 = \frac{1}{2}, \quad (8)$$

$$a^2 p_1 + 3a^2 p_2 + (a^2 + 2a\beta_{31} + 3a\beta_{32} + 6a^2\alpha_{32})p_3 + (3a^2 + 3a\beta_{31} + 4a\beta_{32} + 10a^2\alpha_{32} + 6a^2\alpha_{42})p_4 = \frac{1}{6},$$

$$(\beta_{31}+\beta_{32})^2(p_4+p_3) = \frac{1}{3}.$$

Неравенство для контроля точности вычислений построим по аналогии [3]. Для этого потребуем, чтобы локальная ошибка δ_n метода (4) представлялась в виде

$$\delta_n = \xi h^4 f_n'^3 f_n + O(h^5), \quad (9)$$

где ξ – некоторая постоянная. С применением (6) и (7) нетрудно видеть, что требование (9) приводит к следующим дополнительным соотношениям на коэффициенты метода:

$$(\beta_{31}+\beta_{32})^3(p_4+p_3) = \frac{1}{4},$$

$$a(\beta_{31}+\beta_{32})(\beta_{31}+2\beta_{32})(p_4+p_3) = \frac{1}{8}, \quad (10)$$

$$a(\beta_{31}+\beta_{32})^2(2p_4+p_3) = \frac{1}{12},$$

при этом постоянная ξ вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{1}{24} - a^3 p_1 - 4a^3 p_2 - (a^3 + 3a^2\beta_{31} + 6a^2\beta_{32} + 10a^3\alpha_{32})p_3 - (4a^3 + 6a^2\beta_{31} + 10a^2\beta_{32} + 20a^3\alpha_{32} + 10a^3\alpha_{42})p_4. \quad (11)$$

Устойчивость. Исследуем устойчивость схемы (4) на линейном скалярном уравнении $y' = \lambda y$. Применяя (4) для решения $y' = \lambda y$, получим $y_{n+1} = Q_4(x)y_n$, $x = h\lambda$, где $Q_4(x)$ есть дробно-рациональная функция. Мы не приводим $Q_4(x)$ в силу ее громоздкости. Из вида $Q_4(x)$ следует, что для L-устойчивости (4) необходимо выполнение соотношения

$$a(a-p_1) + (\beta_{31}-a)p_3 = 0. \quad (12)$$

Теперь исследуем устойчивость промежуточной численной формулы (5). Применяя (5) для решения уравнения $y' = \lambda y$, получим $\tilde{y}_{n+1} = Q_2(x)y_n$, где $Q_2(x)$ имеет вид

$$Q_2(x) = \frac{1 + 0,25(3-8a)x + a(a-\beta_{31})x^2}{(1-ax)^2}.$$

Отсюда следует, что промежуточная схема (5) будет L-устойчивая, если $\beta_{31} = a$. Учитывая (12), имеем, что основная схема (4) и промежуточная (5) будут L-устойчивые, если

$$p_1 = \beta_{31} = a. \quad (13)$$

Коэффициенты метода. Исследуем совместность нелинейной системы алгебраических уравнений (8)

и (10) при условии (13). Из четвертого соотношения (8) и первого уравнения (10) следует, что $\beta_{31} + \beta_{32} = 3/4$. Учитывая (13), имеем $\beta_{32} = 3/4 - a$. Из четвертого равенства (8) следует $p_3 + p_4 = 16/27$. Тогда из третьего уравнения (10) имеем $p_4 = a^{-1}(4-16a)/27$ и $p_3 = a^{-1}(32a-4)/27$. Подставляя полученные значения во второе равенство (10), получим квадратное уравнение относительно коэффициента a, т. е.

$$32a^2 - 48a + 9 = 0. \qquad (14)$$

Данное уравнение имеет два вещественных корня: $a_1 = ¾ + 3\sqrt{2}/8$ и $a_2 = 3/4 - 3\sqrt{2}/8$. Отметим, что для известных четырехстадийных численных формул уравнение относительно a имеет четвертую степень. Требование L-устойчивости промежуточной схемы (5) позволило понизить порядок до второго.

Оставшиеся коэффициенты p_2, α_{32} и α_{42} определим из трех первых уравнений (8). В результате получим следующие коэффициенты метода (4):

$$p_1 = \beta_{31} = a,\ \beta_{32} = \frac{3}{4} - a,$$

$$p_2 = \frac{3 - 57a + 312a^2 - 528a^3}{54a^2(4a-1)^2} + \frac{a(4a-1)^2(-162a^2 + 196a - 11)}{54a^2(4a-1)^2},$$

$$p_3 = \frac{32a-4}{27a},\ p_4 = \frac{4-16a}{27a},$$

$$\alpha_{32} = \frac{432a^3 - 1040a^2 + 392a - 24}{64a(4a-1)},$$

$$\alpha_{42} = \frac{-216a^4 + 284a^3 - 154a^2 + 44a - 3}{8a(4a-1)^2}.$$

Подставляя сюда корни уравнения (14), получим два набора коэффициентов вида

$$a = \frac{3}{4} + \frac{3}{8}\sqrt{2},\ \ p_1 = \frac{3}{4} + \frac{3}{8}\sqrt{2},$$

$$p_2 = -\frac{65}{324} - \frac{281}{648}\sqrt{2},\ \ p_3 = \frac{64}{81} + \frac{16}{81}\sqrt{2},$$

$$p_4 = -\frac{16}{81} - \frac{16}{81}\sqrt{2},\ \ \beta_{31} = \frac{3}{4} + \frac{3}{8}\sqrt{2}, \qquad (15)$$

$$\beta_{32} = -\frac{3}{8}\sqrt{2},\ \ \alpha_{32} = -\frac{85}{16} + \frac{395}{128}\sqrt{2},$$

$$\alpha_{42} = \frac{2\,121}{64} - \frac{3\,095}{128}\sqrt{2},\ \ \xi = \frac{2\,461}{3\,072} + \frac{145\sqrt{2}}{256},$$

и следующего

$$a = \frac{3}{4} - \frac{3}{8}\sqrt{2},\ \ p_1 = \frac{3}{4} - \frac{3}{8}\sqrt{2},$$

$$p_2 = -\frac{65}{324} + \frac{281}{648}\sqrt{2},\ \ p_3 = \frac{64}{81} - \frac{16}{81}\sqrt{2},$$

$$p_4 = -\frac{16}{81} + \frac{16}{81}\sqrt{2},\ \ \beta_{31} = \frac{3}{4} - \frac{3}{8}\sqrt{2}, \qquad (16)$$

$$\beta_{32} = \frac{3}{8}\sqrt{2},\ \ \alpha_{32} = -\frac{85}{16} - \frac{395}{128}\sqrt{2},$$

$$\alpha_{42} = \frac{2\,121}{64} + \frac{3\,095}{128}\sqrt{2},\ \ \xi = \frac{2\,461}{3\,072} - \frac{145\sqrt{2}}{256},$$

при которых схема (4) имеет третий порядок точности и является L-устойчивой вместе с промежуточной численной формулой (5).

Контроль точности вычислений. Согласно [6], для контроля точности вычислений метода (4) с локальной ошибкой (9) можно использовать ошибку ε_n вида

$$\varepsilon_n = \xi h^3 f_n'^2 f_n + O(h^4),$$

где постоянная ξ определена формулой (11). Величину ε_n оценим следующим способом. Определим коэффициенты b_i, $1 \le i \le 4$, из условия выполнения соотношения

$$\sum_{i=1}^{4} b_i k_i = h^3 f_n'^2 f_n + O(h^4).$$

Используя разложения (6) стадий k_i, $1 \le i \le 4$, в ряды Тейлора в окрестности точки y_n до членов с h^3 включительно и приравнивая соответствующие соотношения на коэффициенты нулю, получим относительно b_i, $1 \le i \le 4$, линейную систему алгебраических уравнений

$$\begin{gathered} b_1 + b_2 + (1+\alpha_{32})b_3 + (1+\alpha_{32}+\alpha_{42})b_4 = 0, \\ ab_1 + 2ab_2 + (a + \beta_{31} + \beta_{32} + 3a\alpha_{32})b_3 + \\ + (2a + \beta_{31} + \beta_{32} + 4a\alpha_{32} + 3a\alpha_{42})b_4 = 0, \\ a^2 b_1 + 3a^2 b_2 + (a^2 + 2a\beta_{31} + 3a\beta_{32} + 6a^2\alpha_{32})b_3 + \\ + (3a^2 + 3a\beta_{31} + 4a\beta_{32} + 10a^2\alpha_{32} + 6a^2\alpha_{42})b_4 = 1, \\ (\beta_{31} + \beta_{32})^2 (b_4 + b_3) = 0. \end{gathered} \qquad (17)$$

Исследуя совместность (17), получим

$$b_4 = \frac{4}{8a^2\alpha_{32} + 4a^2\alpha_{42} + 3a},\ \ b_3 = -b_4,$$

$$b_2 = -(1 + \alpha_{32} + 2\alpha_{42})b_4,\ \ b_1 = (1 + \alpha_{32} + \alpha_{42})b_4.$$

Подставляя сюда коэффициенты (15) и (16), получим два набора значений b_i, $1 \le i \le 4$ вида

$$b_1 = \frac{3\,968\,960 - 2\,745\,760\sqrt{2}}{331\,989},$$

$$b_2 = \frac{53\,105\,312\sqrt{2} - 76\,687\,712}{2\,987\,901},$$

$$b_3 = \frac{698\,368\sqrt{2} - 217\,088}{2\,987\,901},$$

$$b_4 = \frac{217\,088 - 698\,368\sqrt{2}}{2\,987\,901},$$

и следующего

$$b_1 = \frac{3\,968\,960 + 2\,745\,760\sqrt{2}}{331\,989},$$

$$b_2 = -\frac{76\,687\,712 + 53\,105\,312\sqrt{2}}{2\,987\,901},$$

$$b_3 = -\frac{217\,088 + 698\,368\sqrt{2}}{2\,987\,901},$$

$$b_4 = \frac{217\,088 + 698\,368\sqrt{2}}{2\,987\,901}.$$

Теперь, согласно [6], в неравенстве для контроля точности вычислений можно применять оценку ошибки вида

$$\varepsilon_n = \xi \sum_{i=1}^{4} b_i k_i. \qquad (18)$$

Отметим особенность построенной оценки. Для метода (4) в силу L-устойчивости выполняется соотношение $Q_4(x) \to 0$ при $x \to -\infty$. Так как для точного решения $y(t_{n+1}) = \exp(x)y(t_n)$ задачи $y' = \lambda y$, $y(t_0) = y_0$ выполняется аналогичное свойство, то естественным будет требование стремления к нулю оценки (18) при $x \to -\infty$. В силу того что оценивается главный член ошибки, т. е. первый член при разложении ошибки в ряд Тейлора, для (18) это требование не выполняется. Поэтому вместо (18) будем контролировать оценку вида

$$\varepsilon_n(j_n) = D_n^{1-j_n}\varepsilon_n, \quad 1 \le j_n \le 2, \qquad (19)$$

при этом имеет место $\varepsilon_n(2) \to 0$ при $x \to -\infty$. В результате для контроля точности вычислений и при выборе шага можно применять неравенство

$$\| \varepsilon_n(j_n) \| \le \varepsilon, \quad 1 \le j_n \le 2, \qquad (20)$$

где ε – требуемая точность расчетов. Нетрудно видеть, что в смысле главного члена оценки ε_n и $\varepsilon_n(j_n)$ совпадают при любом значении j_n. Отметим, что применение (19) вместо (18) не приводит к значительному увеличению вычислительных затрат. При $x \to 0$ оценка $\varepsilon_n(1) = \varepsilon_n$ правильно отражает поведение ошибки и нет смысла проверять (20) при других значениях j_n. При резком увеличении шага поведение ошибки ε_n может оказаться неудовлетворительным, что проявляется в повторных вычислениях решения. Поэтому если требуемая точность не выполняется, имеет смысл проверить (20) при $j_n = 2$.

Заметим также, что применение (20) для контроля точности вычислений не приводит к дополнительным вычислениям правой части и матрицы Якоби, потому что в данном неравенстве используются ранее вычисленные стадии k_i, $1 \le i \le 4$.

Результаты расчетов. Численный эксперимент проводился для десяти тестовых примеров [7]. В качестве критерия эффективности алгоритмов выбрано *if* – число вычислений правой части и *ij* – число обращений матрицы D_n на интервале интегрирования. Время вычисления не приводится, потому что для некоторых оно настолько мало, что не может служить объективной характеристикой эффективности метода.

Целью данного численного эксперимента является сравнение эффективности методов вида (4) с дополнительным требованием L-устойчивости промежуточной численной формулы (5) и без данного требования [8]. В конкретных расчетах левая часть $\|\varepsilon_n(j_n)\|$ неравенства (20) вычислялась по формуле

$$\| \varepsilon_n(j_n) \| = \max_{1 \le i \le N} \frac{|\varepsilon_n^i(j_n)|}{|y_n^i| + r},$$

где N – размерность задачи (1); r – некоторая положительная постоянная. Если по i-й компоненте решения выполняется неравенство $|y_n^i| < r$, то контролируется абсолютная ошибка εr, в противном случае – относительная ошибка ε.

Из анализа результатов расчетов следует, что алгоритм интегрирования с коэффициентами (15) эффективнее алгоритма с коэффициентами (16). Поэтому ниже будем рассматривать только метод (4), (15), который назовем ODE_A. Алгоритм интегрирования на основе схемы (4) без требования L-устойчивости (5) назовем ODE_B.

Для решения десяти примеров [7] алгоритму ODE_A потребовалось 748 вычислений правой части и 345 декомпозиций матрицы Якоби при точности $\varepsilon = 10^{-2}$ и *if* = 4 007 и *ij* = 2 231 при точности $\varepsilon = 10^{-4}$. Для алгоритма ODE_B вычислительные затраты следующие: *if* = 916, *ij* = 471 при $\varepsilon = 10^{-2}$ и *if* = 4743, *ij* = 2534 при $\varepsilon = 10^{-4}$. В конце интервала интегрирования фактическая точность вычислений не хуже задаваемой точности. По суммарным затратам эффективность обоих алгоритмов отличается не сильно. Однако на некоторых задачах, на которые приходится небольшой процент вычислительных затрат и жесткость которых достаточно велика, алгоритм ODE_A эффективнее ODE_B примерно в 1,3 раза.

Библиографические ссылки

1. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла и Дж. Уатта. М. : Мир, 1979.

2. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи : монография. М. : Мир, 1999.

3. Новиков Е. А. Явные методы для жестких систем : монография. Новосибирск : Наука, 1997.

4. Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге–Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений : монография. М. : Мир, 1988.

5. Новиков Е. А., Шитов Ю. А., Шокин Ю. И. Одношаговые безытерационные методы решения жестких систем // ДАН СССР. Т. 301. № 6. 1988. С. 1310–1314.

6. Новиков Е. А. Оценка глобальной ошибки одношаговых методов решения жестких задач // Изв. вузов. Математика. 2011. № 6. С. 80–89.

7. Enright W. H., Hull T. E. Comparing numerical methods for the solutions of systems of ODE's // BIT. 1975. № 15. P. 10–48.

8. Новиков Е. А. Исследование (m, 2)-методов решения жестких систем // Вычисл. технологии. Т. 12. № 5. 2007. С. 103–115.

E. A. Novikov

DEVELOPMENT OF (4,2)-METHOD OF ORDER 3 FOR SOLVING STIFF PROBLEMS

We obtain the coefficients of (4,2)*-method for solving stiff systems in which both the main and the intermediate numerical schemes are L-stable. We construct an accuracy control inequality. Numerical tests confirming efficiency and workability of the constructed variable step algorithm were held.*

Keywords: stiff problem, (m,k)-methods, accuracy control.

© Новиков Е. А., 2011

УДК 621.318.562.5

А. Н. Пахомов, М. Ф. Коротков, А. А. Федоренко

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Приведена методика синтеза модальных регуляторов координат векторной системы «преобразователь частоты–асинхронный двигатель» методом стандартных уравнений. Дана оценка качества процессов регулирования координат путем анализа результатов имитационного моделирования системы в среде MatLab.

Ключевые слова: модальный регулятор, электропривод переменного тока, векторная система.

Теория систем векторного управления частотно регулируемого асинхронного электропривода разработана достаточно полно [1; 2]. Контуры регулирования в системе векторного управления выполняются, как правило, в соответствии с принципами подчиненного регулирования координат, что ограничивает их быстродействие и, как следствие, точность в динамических режимах. Обеспечить предельное быстродействие и точность в динамических режимах возможно, снабдив систему так называемым модальным регулятором, построенным на основе суммирования обратных связей по вектору состояния. Вопросы построения таких регуляторов применительно к векторным системам асинхронного электропривода в литературе отражены недостаточно, в связи с чем в данной работе ставится задача разработки методики проектирования модальных регуляторов векторных систем частотно управляемого асинхронного электропривода и проверка ее эффективности с помощью имитационного моделирования в среде MatLab.

В качестве объекта управления принята получившая наибольшее распространение система «преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией – асинхронный двигатель». Поскольку у таких преобразователей автономный инвертор формирует не только частоту, но и амплитуду выходного напряжения, влияние звена постоянного тока на динамические свойства системы при синтезе можно не учитывать. Кроме того, частота модуляции современных преобразователей весьма высока, что позволяет пренебречь также его дискретными свойствами. Изложенное дает возможность представить в первом приближении преобразователь частоты безынерционным линейным звеном с коэффициентом передачи $k_{\text{п}}$.

Математическая модель асинхронного двигателя (АД) с учетом общепринятых допущений [2; 3], в декартовой системе координат *u–v*, вращающейся с произвольной скоростью ω_k, в форме Коши имеет следующий вид [3]:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{di_{1u}}{dt} = \frac{1}{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}u_{1u} - \frac{1}{T_{\text{э}}}i_{1u} + \frac{k_2}{T_2R_{\text{э}}T_{\text{э}}}\Psi_{2u} + \\
&+ \frac{k_2 p_{\text{п}}}{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}\omega\Psi_{2v} + \omega_k i_{1v};\\
&\frac{di_{1v}}{dt} = \frac{1}{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}u_{1v} - \frac{1}{T_{\text{э}}}i_{1v} + \frac{k_2}{T_2R_{\text{э}}T_{\text{э}}}\Psi_{2v} - \\
&- \frac{k_2 p_{\text{п}}}{R_{\text{э}}T_{\text{э}}}\omega\Psi_{2u} - \omega_k i_{1u};\\
&\frac{d\Psi_{2u}}{dt} = R_2k_2i_{1u} - \frac{1}{T_2}\Psi_{2u} + (\omega_k - p_{\text{п}}\omega)\Psi_{2v};\\
&\frac{d\Psi_{2v}}{dt} = R_2k_2i_{1v} - \frac{1}{T_2}\Psi_{2v} - (\omega_k - p_{\text{п}}\omega)\Psi_{2u};\\
&\frac{d\omega}{dt} = \frac{3p_{\text{п}}k_2}{2J}i_{1v}\Psi_{2u} - \frac{3p_{\text{п}}k_2}{2J}i_{1u}\Psi_{2v} - \frac{1}{J}M_{\text{с}},
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}, Ψ_{2u}, Ψ_{2v} – проекции результирующих векторов напряжения статора $\bar{u}_1$, тока статора $\bar{i}_1$, потокосцепления ротора $\overline{\Psi}_2$ соответственно, на оси *u* и *v* декартовой системы координат; $\omega = \omega_{\text{эл}} / p_{\text{п}}$ – угловая скорость вращения ротора;

$\omega_{эл}$ – угловая скорость вращения электромагнитного поля; $M_с$ – момент статического сопротивления на валу двигателя [1–3].

Уравнения динамики АД в векторно-матричной форме имеют вид

$$\dot{X} = F(X, G), \tag{2}$$

где X и G – векторы переменных состояния и входных воздействий, причем

$$X = \begin{pmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \\ \Psi_{2u} \\ \Psi_{2v} \\ \omega \end{pmatrix} \text{ и } G = \begin{pmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \\ \omega_k \\ M_с \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Линеаризованную модель АД будем искать в виде стандартной векторно-матричной формы уравнений состояния

$$\Delta\dot{X} = A\Delta X + B\Delta G, \tag{4}$$

где A и B – матрицы динамики и входа соответственно, которые необходимо определить; ΔX и ΔG – приращения векторов переменных состояния и входных воздействий соответственно.

Применим метод линеаризации на основе разложения уравнений (1) в ряд Тейлора. Тогда матрицы A и B определятся в виде

$$A = \left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_{\substack{G=G_0 \\ X=X_0}} \text{ и } B = \left.\frac{\partial F}{\partial G}\right|_{\substack{G=G_0 \\ X=X_0}}, \tag{5}$$

где X_0 и G_0 – переменные состояния и входные воздействия в точке установившегося режима (центра разложения), значения которых определяются по уравнениям статики.

Взяв производные от уравнений (1) по соответствующим переменным, видим, что матрицы A и B имеют высокий порядок. Для их упрощения необходимо выбрать угловую скорость вращения ω_k системы координат u–v и сориентировать ось u по определенной векторной переменной АД.

Целесообразно использовать систему координат u–v с угловой скоростью вращения магнитного поля $\omega_k = \omega_{0эл}$, ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\Psi_2 = \Psi_{2u}$, $\Psi_{2v} = 0$. Переменная $\omega_k = \omega_{0эл}$ в этом случае определяется зависимостью $\omega_{0эл} = f(i_{1v}, \Psi_{2u}, \omega)$, т. е. она уже не является входным воздействием.

Синтез модального регулятора проведем для управляющего воздействия, т. е. положим $M_с = 0$. Наличие на входе двигателя преобразователя частоты учтем в матрице входа коэффициентом $k_п$. Если скомпенсировать влияние перекрестных обратных связей по току статора, получим матрицы

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_э} & 0 & \frac{k_2}{T_2 R_э T_э} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_э} & -\frac{k_2 p_п}{R_э T_э}\omega_0 & -\frac{k_2 p_п}{R_э T_э}\Psi_{2u0} \\ R_2 k_2 & 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & \frac{3 p_п k_2}{2J}\Psi_{2u0} & \frac{3 p_п k_2}{2J} i_{1v0} & 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\text{и } B = \begin{pmatrix} \frac{k_п}{R_э T_э} & 0 \\ 0 & \frac{k_п}{R_э T_э} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Расчет модальных регуляторов производится отдельно для двух каналов управления: канала регулирования потокосцепления ротора АД и канала регулирования скорости АД. Таким образом, строится два контура регулирования аналогично построению систем двухзонного регулирования скорости электропривода постоянного тока [1].

Разобьем матрицы динамики и входа (6) на две пары для синтеза модальных регуляторов по каждому из каналов регулирования.

Матрицы канала регулирования потокосцепления ротора:

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_э} & \frac{k_2}{T_2 R_э T_э} \\ R_2 k_2 & -\frac{1}{T_2} \end{pmatrix} \text{ и}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{k_п}{R_э T_э} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Матрицы канала регулирования скорости вращения ротора АД:

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_э} & -\frac{k_2 p_п}{R_э T_э}\Psi_{2u0} \\ \frac{3 p_п k_2}{2J}\Psi_{2u0} & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B_2 = \begin{pmatrix} \frac{k_п}{R_э T_э} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Характеристический полином замкнутого по вектору состояния объекта управления можно записать в виде

$$G(p) = \left| p \cdot E - \left(A_i - B_i \cdot K \right) \right| = D(p), \tag{7}$$

где K – коэффициент модального регулятора; E – единичная матрица; $D(p)$– желаемый характеристический полином.

Поскольку корни характеристического уравнения $D(p)=0$ определяют динамические свойства системы, замкнутой через модальный регулятор, то для получения желаемых динамических показателей требуется,

чтобы замкнутая обратная связь по вектору состояния обеспечивала желаемые корни характеристического полинома. Таким образом, необходимо подобрать матрицу K модального регулятора так, чтобы получить в комплексной плоскости желаемое распределение корней характеристического полинома.

Синтез модального регулятора выполняется методом стандартных уравнений в нормированной форме [1]. Для получения нормированной формы исходное уравнение n-го порядка делится на коэффициент при старшей степени D_0 и приобретает корневую форму:

$$p^n + C_1 \cdot \omega_б \cdot p^{n-1} + ... + C_i \cdot \omega_б^i \cdot p^{n-i} + ... + C_{n-1} \cdot \omega_б^n = 0, \quad (8)$$

где $\omega_б$ – базовая частота (среднегеометрический корень), $\omega_б = \sqrt[n]{\frac{D_n}{D_0}}$; $C_i = \sqrt[n]{\frac{D_i}{D_0 \cdot \omega_б^i}}$.

Делением уравнения (8) на $\omega_б^n$ осуществляется переход к нормированному уравнению:

$$C_0 \cdot S^n + C_1 \cdot S^{n-1} + ... + C_i \cdot S^{n-i} + ... + C_{n-1} \cdot S + 1 = 0 \quad (9)$$

с относительным оператором $S = \frac{p}{\omega_б} = \frac{d}{d\tau}$ и относительным временем $\tau = \omega_б \cdot t$.

Рассчитаем коэффициенты обратных связей (ОС) при настройке системы на модульный оптимум: перерегулирование $\sigma = 4,5\,\%$, а относительное время переходного процесса $\tau_{п.п} = 2,8 \ \ \omega_б^{-1}$. Нормированное желаемое уравнение имеет вид [1]

$$S^2 + \sqrt{2} \cdot S + 1. \quad (10)$$

После перехода к абсолютным единицам подставим желаемый характеристический полином в выражение (7) и приравняем значения коэффициентов при одинаковых степенях p, получим вектор коэффициентов модального регулятора для канала регулирования потокосцепления ротора:

$$\begin{pmatrix} K_{11} \\ K_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a_{11} + a_{22} + C_0}{b_{11}} \\ \frac{a_{22}^2 + C_1 \cdot a_{22} + C_0 + a_{12} \cdot a_{21}}{a_{21} \cdot b_{11}} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Аналогично производится расчет второго канала регулирования угловой скорости вращения ротора АД. В качестве примера принята настройка по биномиальному разложению $(S+1)^n$: перерегулирование $\sigma = 0$ %, а время переходного процесса $\tau_{п.п} = 4,8 \ \omega_б^{-1}$.

Приведем расчет переходных процессов в замкнутой системе асинхронного электропривода при помощи пакета имитационного моделирования Matlab фирмы The MathWorks, Inc. Воспользуемся соответствующей структурной схемой замкнутой системы асинхронного электропривода в неподвижной системе координат (рис. 1), в которой переменные ОЭМ характеризуют поведение реальных координат АД.

В схеме приняты следующие обозначения.

Модель АД, реализованная по уравнениям состояния (1) – *AD*.

Коэффициенты усиления, обеспечивающие требуемые потокосцепление и скорость ротора АД при наличии ОС – k_{1u}, k_{2u}.

Блоки преобразователя координат – m_1, m_3, m_5, реализованные по уравнениям

$$\left.\begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cdot \cos\theta + i_\beta \cdot \sin\theta; \\ i_y &= i_\alpha \cdot \sin\theta - i_\beta \cdot \cos\theta; \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} u_\alpha &= u_x \cdot \cos\theta - u_y \cdot \sin\theta; \\ u_\beta &= u_x \cdot \sin\theta + u_y \cdot \cos\theta; \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} \cos\theta &= \frac{F_{xr}}{\sqrt{F_{xr}^{\ 2} + F_{yr}^{\ 2}}}; \\ \cos\theta &= \frac{F_{yr}}{\sqrt{F_{xr}^{\ 2} + F_{yr}^{\ 2}}}; \\ F &= \sqrt{F_{xr}^{\ 2} + F_{yr}^{\ 2}}. \end{aligned}\right\}$$

Блок компенсаций перекрестных связей – *BK*, реализованный по уравнениям

$$\left.\begin{aligned} U_{yx} &= U_{y1x} - i_y \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_э \cdot T_э}{k_п}; \\ U_{yy} &= U_{y1y} + i_x \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_э \cdot T_э}{k_п}, \end{aligned}\right\}$$

где U_{yx}, U_{yy} – управляющие воздействия на входе системы.

Переходные процессы в представленной модели изображены на рис. 2. Они совпадают с переходными процессами во вращающейся системе координат, что подтверждает правильность преобразования координат. Сначала подается задание на потокосцепление ротора АД, которое успешно отрабатывает канал регулирования потокосцепления, после чего производится скачкообразное изменение задания на скорость вращения ротора и включается в работу второй канал. И, наконец, на третьем участке осуществляется моделирование наброса нагрузки на валу АД.

Характер переходных процессов соответствует заданным настройкам. Следовательно, регуляторы позволяют обеспечить требуемый уровень скорости и потокосцепления как в неподвижной, так и во вращающейся системах координат.

Библиографические ссылки

1. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов : учеб. для студ. высш. учеб. заведений ; под ред. В. М. Терехова. М. : Академия, 2005.

2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2006.

3. Карагодин М. С., Федоренко А. А. Уравнения динамики частотно-управляемых электроприводов : учеб. пособие / Краснояр. политехн. ин-т. Красноярск, 1985.

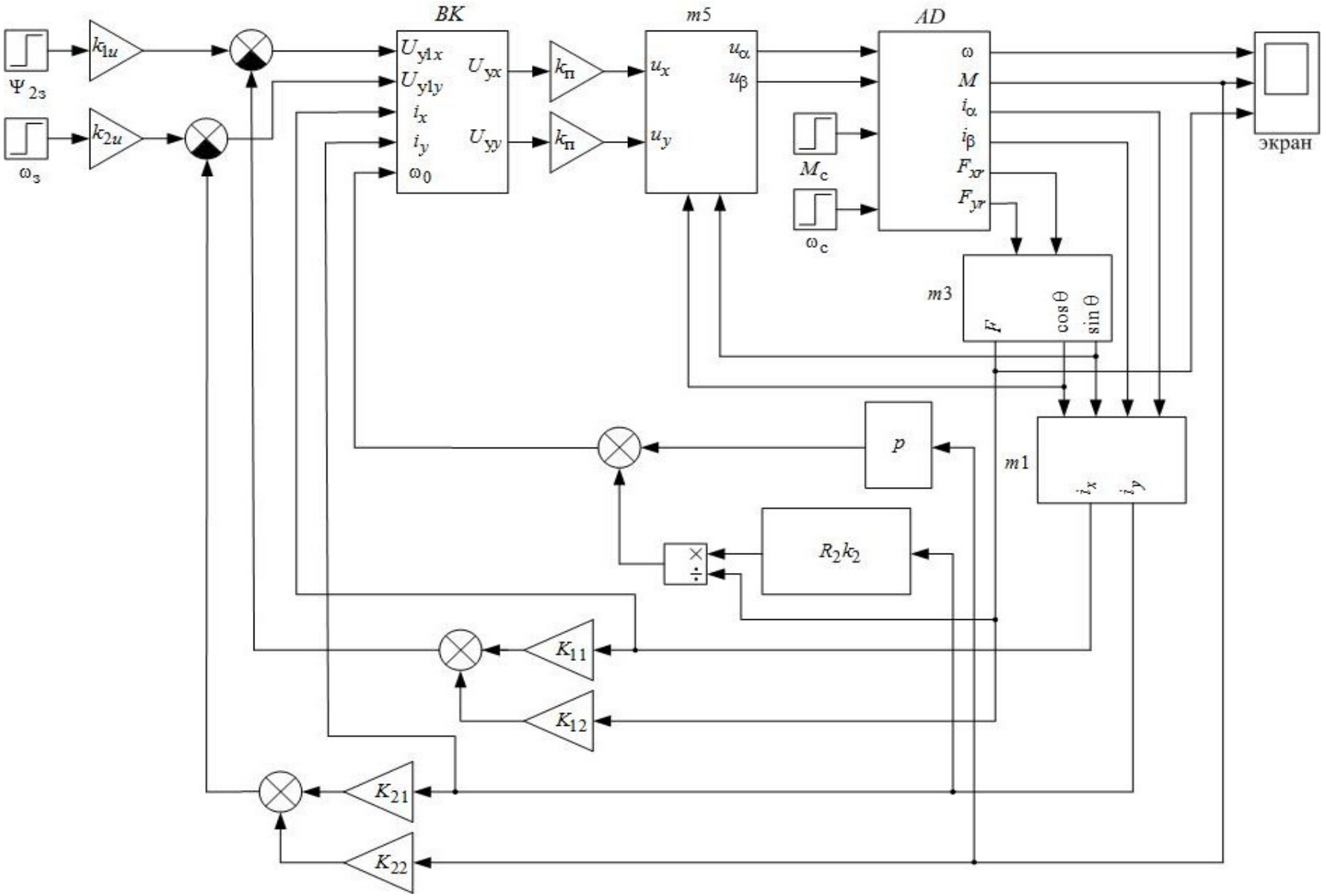


Рис. 1. Модель электропривода в неподвижной системе координат

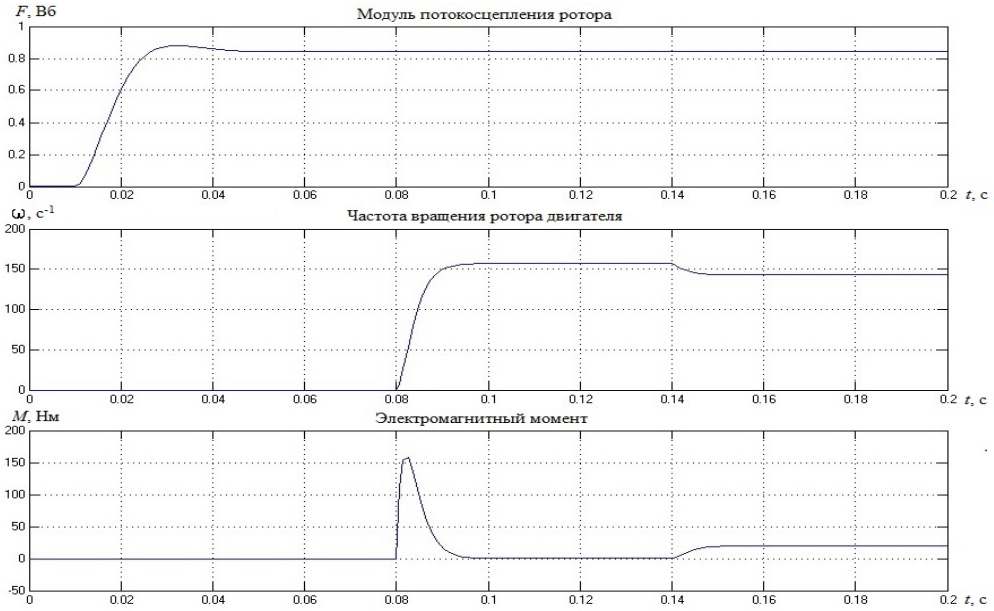


Рис. 2. Графики переходных процессов в неподвижной системе координат

A. N. Pakhomov, M. F. Korotkov, A. A. Fedorenko

ALTERNATING CURRENT ELECTRIC DRIVE MODAL CONTROL

The technique of synthesis of modal regulators of coordinates of vector system "the converter of frequency-asynchronous engine" is resulted by a method of the standard equations. The estimation of quality of processes of regulation of coordinates by the analysis of results of simulation modeling of the system in the environment of MatLab is given.

Keywords: modal regulator, alternating current electric drive, vector system.

© Пахомов А. Н., Коротков М. Ф., Федоренко А. А., 2011

УДК 004.912

К. В. Полянский

ПОСТРОЕНИЕ ФРЕЙМОВОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТЕРМОВ

Рассмотрена фреймовая модель представления знаний в IP-системах машинного перевода. Предложен алгоритм сегментации исходного и целевого текста через связь. Проанализированы различные методы кластеризации термов, определены наиболее эффективные из них для разбиения текста на кластеры.

Ключевые слова: машинный перевод, сегментация текста, кластеризация термов, фреймовая модель.

Важным этапом в IP-переводе (машинном переводе, использующем ресурсы информационно-поисковых систем) на стадии синтеза является сопоставление исходного текста (ИЯ-текста) и релевантных текстов на целевом языке (ЦЯ-текстов), выявление в них схожих сегментов. Процесс такого сопоставления выполняется в несколько шагов:

1) сегментация текста;

2) кластеризация сегментов;

3) построение фреймовой модели структуры текста.

Рассмотрим каждый шаг подробнее.

Сегментация текста. Для анализа структуры предложений ИЯ- и ЦЯ-текстов необходимо поделить эти предложения на логические сегменты, где каждый сегмент будет семантически самостоятельной единицей. Сегментом назовем непрерывный фрагмент тек-

ста, состоящего из термов одного языка, обозначающих связанную по некоторому критерию группу понятий. Составными частями сегмента могут быть термы следующих видов:

– объект (*obj*);
– субъект (*sub*);
– действие (*do*);
– свойство (*pro*);
– связь (*con*).

Идентификация составных частей сегмента осуществляется после проведения стемминга, когда установлена принадлежность термов к тем или иным частям речи. Определяется, что объект (*obj*) и субъект (*sub*) являются существительными, действие (*do*) – глаголом, свойство (*pro*) – прилагательным, а связь (*con*) включает в себя все знаки пунктуации, предлоги, союзы и частицы.

Выделение сегментов можно производить несколькими методами. Рассмотрим наиболее эффективный метод сегментации – сегментацию через связь (*con*). В основе данного метода лежит предположение о том, что семантические скопления термов в ИЯ- и ЦЯ-предложениях отделены друг от друга связями (*con*) – знаками препинания, предлогами, союзами и частицами [1].

Таким образом, при каждом возникновении связи (*con*) происходит трансформация семантической структуры, возникает новый сегмент текста, несущий новую семантику. Следовательно, для осуществления сегментации текста необходимым и достаточным является наличие словаря служебных частей речи и словаря знаков препинания. Механизм сегментации через связь (*con*) для фрагмента предложения «*The goal of integrating syntactic information into translation model…*» приведен на рис. 1.

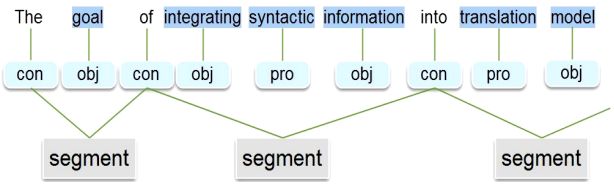


Рис. 1. Сегментация через связь (*con*)

Кластеризация. Для управления полученными сегментами применяется фреймовая модель представления знаний, где каждый терм сегмента описывается соответствующим фреймом. Однако для формирования такой модели предварительно необходимо сгруппировать имеющиеся в сегментах термы в кластеры – группы термов со схожими свойствами. Рассмотрим несколько алгоритмов кластеризации.

Для каждого вида термов (*obj*, *sub*, *pro*, *do*, *con*) определен ряд характеризующих их признаков. Так, для термов *obj*, *sub* и *pro* такими признаками являются «род», «число» и «падеж», для термов *do* – это «время», «вид» и «залог», а для термов *con* отличительными признаками являются свойства «предлог», «союз» и «пунктуация». Каждый из этих признаков, в зависимости от типа терма, принимает определенные значения. Например, свойство «род» может принимать одно из трех значений [мужской, женский, средний], а свойство «вид» – всего два значения [совершенный, несовершенный] и т. д. Данные значения берутся в качестве критериев кластеризации – деления на группы в зависимости от принимаемых значений. Для формализации значений термов сопоставим каждому значению числовую меру. Так, например, значениям [мужской, женский, средний] сопоставим значения [1, 2, 3], а значениям [совершенный, несовершенный] – значения [1, 2] и т. д. Таким образом, данные числовые значения играют роль расстояний между свойствами термов. Функция расстояния между двумя свойствами x_i и x_j записывается как $L(x_i, x_j)$ и обладает следующими признаками.

Неотрицательность расстояния:

$$L(x_i, x_j) \geq 0 . \quad (1)$$

Симметрия:

$$L(x_i, x_i) = 0 . \quad (2)$$

Неразличимость тождественных свойств:

$$L(x_i, x_j) = L(x_j, x_i) . \quad (3)$$

Неравенство треугольника:

$$L(x_i, x_j) \leq L(x_i, x_k) + L(x_k, x_j) . \quad (4)$$

Если все свойства термов $x_1, x_2, ..., x_n$ представить в виде матрицы данных X размером $p \times n$

$$X \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & ...x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & ...x_{2n} \\ x_{p1} & x_{p2} & ...x_{pn} \end{pmatrix} = (x_1, x_2, ..., x_n) , \quad (5)$$

то расстояния $L(x_i, x_i)$ могут быть представлены в виде матрицы расстояний, имеющей симметричный вид:

$$L = \begin{pmatrix} 0 & L_{12} & ...L_{1n} \\ L_{21} & 0 & ...L_{2n} \\ L_{n1} & L_{n2} & ...0 \end{pmatrix} . \quad (6)$$

Чем больше мера $L(x_i, x_i)$, тем больше отличие в свойствах термов, а, следовательно, возрастает и вероятность принадлежности термов к разным кластерам. И наоборот, чем меньше значение $L(x_i, x_i)$, тем больше вероятность того, что термы принадлежат одному кластеру.

Расстояние $L(x_i, x_i)$ может быть вычислено несколькими способами.

Общая формула геометрического расстояния в многомерном пространстве, т. е. расстояния Минковского, определяется по формуле

$$L_p(x_i, x_j) = \left(\sum_{k=1}^{d} \left| x_{k,i} - x_{k,j} \right|^p \right)^{1/p} , \quad (7)$$

где d – размерность пространства; p – количество значений, принимаемое признаками.

Частным случаем геометрического расстояния между несколькими значениями свойств того или иного терма является евклидово расстояние. Его формула приведена ниже:

$$L_2(x_i, x_j) = \left[\sum_{k=1}^{d} \left(x_{k,i} - x_{k,j} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Следующий тип расстояния – манхэттенское (сити-блок, хэмминговское) расстояние:

$$L_1(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^{d} \left| x_{k,i} - x_{k,j} \right|. \quad (9)$$

Однако манхэттенское расстояние обычно применяют при наличии дихотомических свойств (свойств, имеющих два значения). А так как некоторые свойства термов могут принимать более чем два значения, то такой тип расстояния является непригодным для кластеризации термов ИЯ- и ЦЯ-текстов.

Еще одним типом расстояния является супремум-норма (расстояние Чебышева):

$$L_\infty(x_i, x_j) = \sup \left\{ \left| x_{k,i} - x_{k,j} \right| \right\}. \quad (10)$$

Анализ рассмотренных типов расстояния показал, что для задачи кластеризации сегментов ИЯ- и ЦЯ-текстов пригодными являются расстояние Чебышева и евклидово расстояние [2].

Построение фреймовой модели структуры текста. После того как исходный и целевые тексты разбиты на сегменты и проведена кластеризация термов для всех сегментов, строится фреймовая модель представления полученной структуры (см. таблицу). Для каждого вида термов – *obj*, *sub*, *pro*, *do, con* – определяется одноименный вид фрейма, хранящий информацию о свойствах связанного с ним терма.

Структура фреймов, используемых при построении шаблонов

Имя фрейма	Идентификатор, присваиваемый фрейму, уникальный в данной фреймовой системе (*obj*, *sub*, *pro*, *do*, *con*)
Слоты	Свойства фрейма, принимающие значения из некоторого диапазона
Демоны	Автоматически запускаемые процедуры. Выполняются при осуществлении каких-либо действий над слотом: *IF-NEEDED* – указывает, какое действие необходимо выполнить если значение вставляется в пустой слот. *IF-ADDED* – указывает, какое действие необходимо выполнить при добавлении в слот значения. *IF-REMOVED* – указывает, какое действие необходимо выполнить при удалении значения из слота

Все свойства термов хранятся в слотах фрейма и имеют строковый тип данных. Так, например, для фрейма *do*, описывающего термы-глаголы определено три слота: время, вид и залог. При обработке терма-глагола формируется экземпляр фрейма *do*, а свойства терма записываются в слоты. Результат записи может выглядеть следующим образом: время – прошедшее, вид – несовершенный, залог – активный.

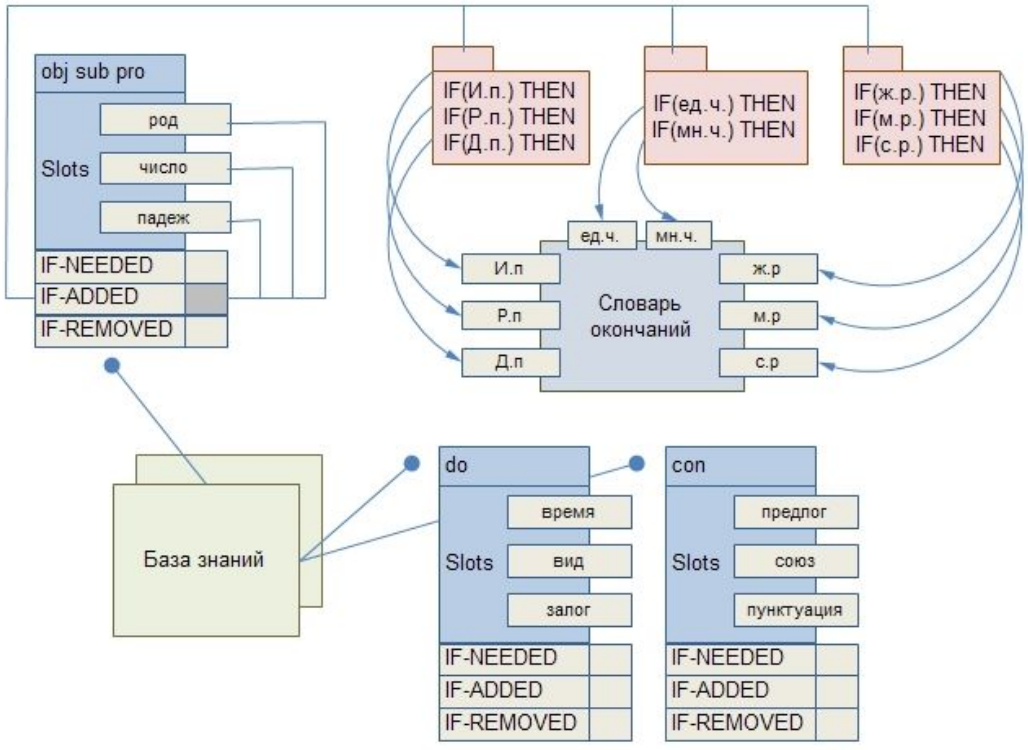


Рис. 2. Фреймовое представление знаний

Описание структуры фрейма. Сразу после добавления свойств терма в слоты соответствующих фреймов происходит вызов демона *IF-ADDED*, запуск которого осуществляется при каждой очередной вставке значения в тот или иной слот. Демон *IF-ADDED*, в зависимости от того, каким фреймом он был вызван, вызывает соответствующую процедуру приведения значения свойства терма, хранящегося в слоте к форме на целевом языке.

Так, например, при вставке в слот «число» значения «множественное» демон *IF-ADDED* вызовет процедуру преобразования формы терма из множественного числа исходного языка к множественному числу целевого языка. Для этого преобразующая процедура обращается к имеющемуся в системе словарю окончаний для пары «ИЯ–ЦЯ». Таким образом, формируется база знаний на основе фреймового представления (рис. 2), хранящая информацию о структуре сегментов текста и термов, образующих эти сегменты.

Данная модель пригодна для осуществления сопоставления исходного и целевых текстов на этапе синтеза ЦЯ-текста в IP-системе машинного перевода, а также для выполнения посегментного перевода фраз ИЯ-текста в фразы ЦЯ-текста.

Рассмотренная фреймовая модель является эффективным средством представления знаний в IP-системе машинного перевода на этапе синтеза текста, так как позволяет управлять формой термов при переходе от исходного языка к целевому, является менее громоздкой, чем представление через нейронную сеть, и более гибкой, чем продукционное представление. Приведенный алгоритм сегментации текста через связь позволяет быстро и эффективно производить разбиение текстового массива на фрагменты, что ускоряет процесс их анализа.

Библиографические ссылки

1. Мультилингвистическая модель распределенной системы на основе тезауруса / П. В. Зеленков, И. В. Ковалев, М. В. Карасева, С. В. Рогов // Вестник СибГАУ. Вып. 1(18). 2008. С. 26.

2. Заболеева-Зотова А. В., Камаев В. А. Лингвистическое обеспечение автоматизированных систем. М. : Высш. шк., 2008. С. 174–177.

K. V. Polyansky

TRANSLATING FRAME MODEL CONSTRUCTION WITH USE OF TERMS CLUSTERING

The knowledge representation frame model in IP-systems of machine translation is considered. The segmentation algorithm of the source and target text through communication is offered. Various terms clustering methods are analysed, the most suitable are offered to clusters text splitting.

Keywords: machine translation, text segmentation, terms clustering, frame model.

© Полянский К. В., 2011

УДК 519.8

Е. С. Семенкин, А. А. Шабалов, С. Н. Ефимов

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДОМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ*

Рассмотрены методы автоматизированного проектирования интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) для решения сложных задач анализа данных и принятия решений. При генерации нейросетевых моделей, систем на нечеткой логике и нейро-нечетких систем применяются эволюционные алгоритмы. В проектировании коллектива ИИТ с целью повышения эффективности и надежности системы предложено применять метод генетического программирования.

Ключевые слова: нейронные сети, системы на нечеткой логике, нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы, генетическое программирование, коллективное принятие решений.

На сегодняшний день интеллектуальные системы получили широкое распространение при решении сложных задач анализа данных в различных областях человеческой деятельности. Искусственные нейронные сети [1], нечеткая логика [2], нейро-нечеткие системы [3], эволюционные алгоритмы [4] и другие методики и технологии являются популярным объектом исследования в силу их способности решать сложные интеллектуальные задачи, которые трудно решить с помощью классических методов [5].

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (НИР НК-136П/3, гос. контракт П1007) и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (НИР 2011-1.9-519-005-042, гос. контракт 11.519.11.4002).

Гибридные подходы привели к значительному росту интереса к сфере проектирования ИИТ. Наиболее популярными являются гибридизация нейронных сетей и генетических алгоритмов (ГА), нечеткой логики и ГА, нейронных сетей и аппарата нечеткой логики.

Автоматическое проектирование ИИТ – сложная оптимизационная задача, структура которой не позволяет эффективно решить ее с помощью классических методов. Генетические алгоритмы представляют собой параллельную, робастную поисковую оптимизационную процедуру, основанную на принципах естественной эволюции. Популяция индивидов, представляющих решение, приспосабливается в процессе эволюции посредством генетических операторов, таких как селекция, рекомбинация и мутация, максимизируя таким образом пригодность (минимизируя функцию стоимости) [6]. ГА продемонстрировали высокую эффективность при решении сложных практических задач с многоэкстремальными целевыми функциями. Кроме их возможности находить субоптимальные решения в сложных пространствах, структура кодирования и независимость от свойств меры качества делает их подходящим инструментом, позволяющим включить в себя априорные знания об исследуемом объекте или процессе [7].

Алгоритм генетического программирования оперирует компьютерными программами, представленными деревьями. Желаемая цель достигается путем выращивания популяции деревьев с использованием принципа естественного отбора и генетических операторов [8].

Для решения поставленной задачи необходимо определить функциональное множество (множество используемых функций) и терминальное множество (набор переменных функций, используемые типы констант), которые должны обладать свойствами замкнутости и достаточности.

Автоматизированное проектирование ИИТ. Рассмотрим применение генетических алгоритмов при генерации нейросетевых моделей, систем на нечеткой логике и нейро-нечетких систем.

Нейросетевые модели. В качестве структуры нейронной сети был взят многослойный персептрон как наиболее распространненый вид нейросетевых моделей. Обучение данной структуры, как правило, осуществляется на основе алгоритма обратного распространения ошибки. Сложность проектирования заключается в исходном выборе количества скрытых слоев и числа нейронов на каждом скрытом слое, структура которых для каждой задачи заранее неизвестна, а также в выборе функций активации нейронов. Недостатками алгоритма обратного распространения ошибки являются низкая скорость сходимости, чувствительность к шуму, зависимость качества функционирования от эвристически выбираемого шага обучения, и, как правило, недостижение глобального экстремума ошибки моделирования ввиду ее сложности [9].

Для преодоления упомянутых проблем предлагается применить генетические алгоритмы для генерирования структуры персептрона и настройки его весовых коэффициентов.

Хромосома структуры нейронной сети кодируется следующим образом. Изначально исследователем задается максимальное количество скрытых слоев и максимальное количество нейронов на каждом слое. При кодировании проход по сети проводится сверху вниз, слева направо по каждому нейрону. Длина хромосомы каждого нейрона будет состоять из 4 или 5 бит при использовании набора из 8 или 16 активационных функций соответственно. Первый бит указывает на наличие или отсутствие нейрона в сети, остальные биты кодируют информацию о номере функции активации. Таким образом, длина хромосомы, кодирующей структуру нейронной сети, будет равна максимальному количеству нейронов, умноженному на длину хромосомы одного нейрона.

Весовые коэффициенты кодируются аналогично. Исследователем задается интервал изменения весовых коэффициентов и точность (дискретизация числа), на основании чего определяется количество бит n для кодирования вещественного числа. Длина хромосомы, кодирующей весовые коэффициенты, равно числу n, умноженному на число всех коэффициентов текущей сети.

Таким образом, необходимо сгенерировать популяцию индивидов, представляющих структуры нейронной сети, и для каждой структуры – отдельную популяцию весовых коэффициентов. Условием останова является либо число поколений структуры, либо ошибка моделирования (обычно среднеквадратичная).

Системы на нечеткой логике. При проектировании нечетких систем эксперт сталкивается с проблемой выбора исходных нечетких правил, набор которых может оказаться неполным или противоречивым. Выбор параметров функций принадлежности, описывающих входные и выходные переменные объекта, происходит субъективно и может некорректно отображать реальную действительность [10].

В силу этого для повышения обоснованности принятия решений при проектировании нечетких систем были применены ГА. При генерации нечеткой системы использовался питтсбургский подход. Изначально необходимо задать максимальное количество правил $N_{\max}$. В процессе обучения настраиваются следующие параметры базы знаний: параметры функций принадлежности, определяющие центр и ширину термов, количество правил, общая длина всей базы правил благодаря включению дополнительного терма – терма «игнорирование». Схемы кодирования хромосомы по Мамдани и по Такаги–Сугено (нулевого порядка) представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Нейро-нечеткие системы. Процесс генерирования нейро-нечетких моделей происходит в два этапа [11; 12]. Первый этап («обучение без учителя») заключается в кластеризации исходных числовых данных методами конкурентного обучения с механизмом штрафования соперника, алгоритмом адаптивной резонансной теории и др., после чего получаем «грубые» нечеткие правила. Второй этап («обучение с учителем») состоит в «тонкой» настройке базы правил (семантики лингвистических термов) на основе градиентных алгоритмов, недостатки которых широко известны и пре-

пятствуют эффективному использованию нейронечетких систем. Поэтому в работе применяется ГА, эффективность использования которого на практических задачах показана в [13; 14] и превосходит метод наискорейшего спуска.

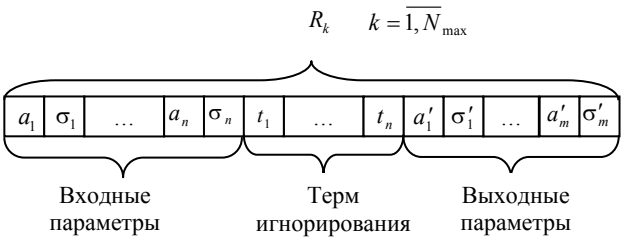


Рис. 1. Представление кодирования хромосомы по Мамдани

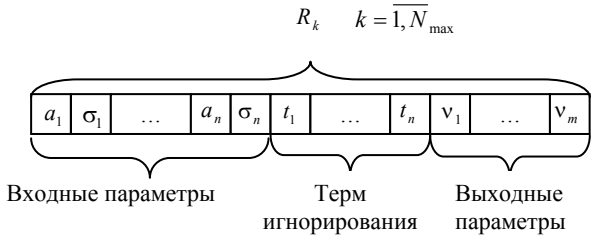


Рис. 2. Представление кодирования хромосомы по Такаги–Сугено нулевого порядка

Формирование коллектива на основе метода генетического проектирования. С целью повышения эффективности и надежности системы предлагается применять метод генетического программирования для формирования состава коллектива ИИТ при решении сложных задач и формы взаимодействия участников коллектива при получении результирующего решения, основанного на частных решениях индивидуальных технологий.

При таком подходе существует два варианта гибридизации ИИТ.

Первый вариант заключается в построении математического выражения из результатов отдельных членов коллектива. В данном случае элементами терминального множества алгоритма генетического программирования являются частные решения отдельных систем. Функциональное множество при данном подходе включает в себя математические функции и арифметические операции.

На предварительном этапе необходимо сгенерировать и обучить заданное (установленное пользователем) число элементов терминального множества, которые будут в дальнейшем использоваться в работе алгоритма. В данной постановке задачи существует два способа реализации мутации: либо случайным образом выбирать обученный элемент из терминального множества, либо генерировать полностью новую интеллектуальную систему.

Второй вариант подхода заключается в формировании гибридной многослойной системы, состоящей из отдельных элементов этого коллектива. Терминальное множество представляется отдельной структурой ИИТ. Элементами функционального множества в этом случае являются правила соединения отдельных технологий между собой.

При реализации данного подхода заранее необходимо задать число циклов обучения каждой технологии. При генерации новой популяции индивидов получаются новые структуры, вследствие чего каждая отдельная технология заново проектируется.

Апробация предложенных подходов на практических задачах. Для апробации предложенных схем автоматизированного проектирования интеллектуальных информационных технологий была разработана программная система для решения прикладных задач моделирования, классификации, кластеризации, прогнозирования и управления (рис. 3).

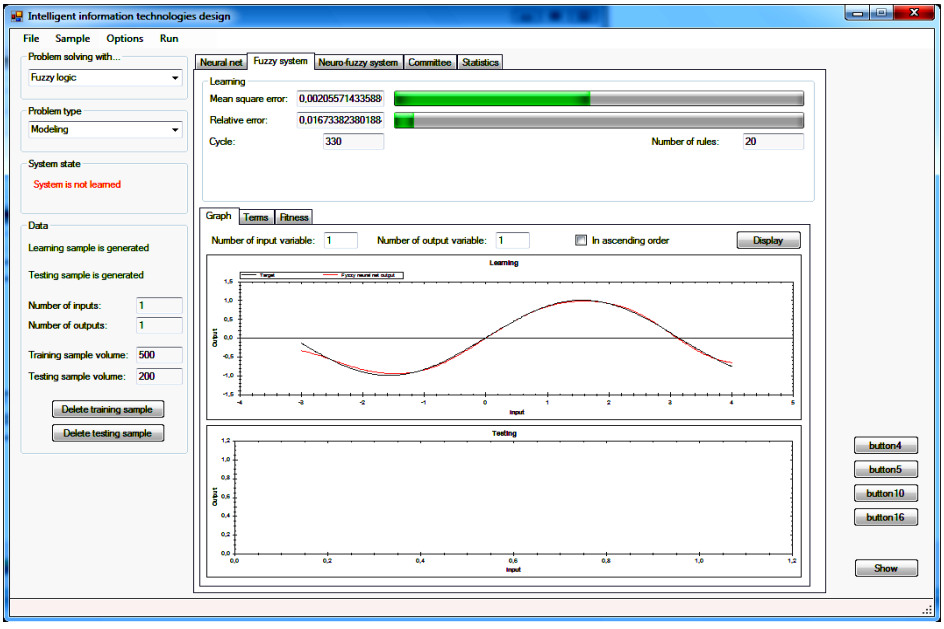


Рис. 3. Главное окно программы

Таблица 1

Апробация методов автоматизации ИИТ

Задача	Размерность входа	Размерность выхода	Объем выборки	
			Обучение	Экзамен
Репозиторий машинного обучения UCI				
Классификация ирисов	4	3	135	15
Классификация вин	13	3	163	15
Предсказание лесных пожаров	12	1	477	40
Распознавание типов земель по спутниковым изображениям	36	6	4 435	2 000
Практические задачи				
Прогнозирование состояния турбины по вибрационным характеристикам	11	12	1 000	400
Моделирование процесса рудно-термической плавки	9	1	47	10
Прогнозирование деградации электрических характеристик солнечных батарей космического аппарата	7	4	177	20

При реализации генетического алгоритма за основу был принят ГА с модифицированным оператором множественной равномерной рекомбинации ввиду его более высокой эффективности по сравнению со стандартным ГА [15; 16].

Для апробации подходов использовались практические задачи (табл. 1). Часть из них была взята из репозитория машинного обучения UCI.

Для каждого типа ИИТ было выполнено 20 запусков программы. При каждом запуске были получены работоспособные системы. Лучшие результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты решения практических задач

№	Нейронная сеть		Система на нечеткой логике		Нейро-нечеткая система	
	Ошибка					
	О	К	О	К	О	К
1	5	1	2	0	2	0
2	1	1	0	0	0	0
3	–	–	16,87 %	19,61 %	15,67 %	17,5 %
4	1,78 %	1,79 %	1,11 %	1,11 %	1,45 %	1,46 %
5	9,11 %	9,14 %	8,07 %	8,09 %	7,99 %	7,97 %
6	4,86 %	4,97 %	2,99 %	3,01 %	2,81 %	2,92 %
7	–	–	5,66 %	7,66 %	5,05 %	5,87 %

Примечания. Приняты следующие обозначения: О – обучающая выборка, К – контрольная выборка. В задачах классификации в качестве ошибки приводится количество неправильно классифицируемых признаков, в остальных задачах – средняя относительная ошибка.

По данным табл. 2 видно, что во многих случаях наилучшее качество моделирования имеет нейро-нечеткая система. При этом все типы ИИТ демонстрируют эффективность, сопоставимую с известными результатами.

Ниже приведены примеры построения коллектива на основе математического выражения из частных решений отдельных технологий. На начальной стадии заранее были сгенерированы и обучены по 10 ИИТ каждого типа.

На примере задачи классификации вин была получена следующая формула:

$$C = \sin\left(NFN_4 \cdot \sqrt{e^{NFN_{10}}}\right),$$

где C – номер класса. При этом ошибка распознавания составила 0 % как на обучающей выборке, так и на контрольной, что лучше, чем у нейросетевых и нечетких моделей по отдельности и сравнимо с нейро-нечеткими. При этом отдельные ИИТ, превосходящие остальные по качеству моделирования, в коллектив не вошли.

В задаче моделирования процесса рудно-термической плавки получено выражение

$$\mathrm{Ni}(\%) = NFN_{10} \cdot e^{\frac{FIS_6}{\frac{FIS_6 \cdot e^{\frac{FIS_6}{NFN_9}}}{FIS_{10}}}},$$

определяющее процентное содержание никеля в отработанном шлаке. Относительная ошибка составила 2,21 % на обучающей выборке и 2,33 % на тестовой, что лучше, чем у каждой индивидуальной ИИТ в отдельности.

В ходе многочисленных экспериментов было выявлено, что отдельные технологии, превосходящие по качеству моделирования остальные, не всегда присутствуют в конечной формуле. В композиции могут принимать участие технологии с разным качеством моделирования, коллектив которых позволяет тем самым увеличить эффективность и надежность системы в целом.

Таким образом, программная система, реализующая разработанный подход, дает возможность автоматически генерировать нейросетевые модели, нечеткие и нейро-нечеткие системы, т. е. позволяет решать сложные задачи анализа данных и принятия решений (задачи моделирования, классификации, прогнозирования, управления и др.). Автоматическое формирование коллектива ИИТ позволяет увеличить надежность и эффективность системы. Полученные результаты подтверждены решением ряда практических задач.

Дальнейшее развитие системы направлено на расширение ее функциональности за счет включения других типов ИИТ (динамических нейросетей, сетей Кохонена и Хопфилда–Танка, деревьев решений, многокритериального выбора и т. д.), повышения адаптивности за счет автоматизации настройки эволюционных алгоритмов, а также доработки методов проектирования коллективов при сетевом подходе.

Библиографические ссылки

1. Rojas R. Neural networks: a systematic introduction. Berlin : Springer, 1996.

2. Yager R. R., Filev D. P. Essentials of fuzzy modeling and control. N. Y. : Wiley, 1994.

3. Tommi O. Neuro-fuzzy in control // Tampere Univ. of Technology. Tampere, 1995.

4. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computation. Berlin : Springer, 2003.

5. Konar A. Computational Intelligence: Principles, techniques and applications. Berlin : Springer, 2005.

6. Haupt R. L., Haupt S. E. Practical Genetic Algorithms. N. Y. : Wiley-Interscience, 2004.

7. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading : Addison-Wesley, 1989.

8. Koza J. R. Genetic programming. London : MIT Press, 1998.

9. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика : пер. с англ. М. : Мир, 1992.

10. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М. : Физматлит, 2001.

11. Castellano G., Fanelli A. M. A self-organizing neural fuzzy inference network // Proc. of IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN-2000). Vol. 5. Como, 2000. P. 14–19.

12. Castellano G., Fanelli A. M. Information granulation via neural network based learning // Proc. of Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS Intern. Conf. (IFSA-NAFIPS 2001). Vancouver, 2001. P. 3059–3064.

13. Шабалов А. А. Автоматическая настройка параметров нейро-нечетких систем генетическим алгоритмом // Информ. технологии и мат. моделирование : сб. науч. тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 2. Томск, 2009. С. 296.

14. Шабалов А. А. Автоматизация проектирования нейро-нечетких систем с помощью эволюционного алгоритма // Студент и науч.-техн. прогресс // Материалы XLVIII междунар. науч. студ. конф. Новосибирск, 2010. С. 290.

15. Шабалов А. А. Исследование эффективности модификации оператора равномерного скрещивания эволюционного алгоритма в задаче управления реальными инвестициями // Информ. технологии и мат. моделирование : сб. науч. тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 1. Томск, 2008. С. 175–177.

16. Шабалов А. А. Применение эволюционных алгоритмов с модифицированным оператором равномерного скрещивания в задаче поддержки принятия решений при управлении реальными инвестициями // Решетневские чтения : материалы XII междунар. науч. конф. Красноярск, 2008. С. 284–285.

E. S. Semenkin, A. A. Shabalov, S. N. Efimov

AUTOMATED DESIGN OF INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGY KOLLEKTIVES BY MEANS OF GENETIC PROGRAMMING TECHNIQIE

Intelligent information technology automated design for solving complex problem of data analysis and decision support is considered in this paper. Evolutionary algorithms are applied for generating connectionist models, fuzzy systems and neuro-fuzzy systems. Genetic programming technique application for intelligent information technologies kollektives design is proposed for system effectiveness and reliability improvement.

Keywords: neural networks, fuzzy rules based systems, neuro-fuzzy systems, evolutionary algorithms, genetic programming, group decision making.

© Семенкин Е. С., Шабалов А. А., Ефимов С. Н., 2011

УДК 539.374

С. И. Сенашов

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ЗАДАЧЕ О ПРОДОЛЬНОЙ ПЛОСКОЙ ВОЛНЕ НАГРУЗКИ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ СТЕРЖНЕ*

С помощью законов сохранения решена задача о распространении продольной плоской волны нагрузки в однородном полубесконечном упругопластическом стержне.

Ключевые слова: волна нагрузки, пластическая среда, закон сохранения, точное решение, стержень.

1. Рассмотрим процесс распространения пластических деформаций в полубесконечном упругопластическом стержне, вызванных приложенной к концу стержня динамической нагрузкой $p(t)$, не убывающей во времени (т. е. $dp/dt \geq 0$). Проведем решение в лагранжевой системе координат: за ось x возьмем ось стержня, начало координат $x = 0$ выберем на левом конце стержня. Предположим, что в процессе деформации не происходит бокового выпучивания стержня и что влияние поперечных деформаций стержня на процесс распространения продольных волн пренебрежимо мало. Рассмотрим малые деформации стержня и будем предполагать, что плотность стержня в процессе деформирования не изменяется. Единственной отличной от нуля составляющей тензора напряжений будет $\sigma_{xx} = \sigma$, отличными от нуля составляющими тензора деформаций будут $\varepsilon_{xx} = \varepsilon$ и $\varepsilon_{yy} = \upsilon\varepsilon$.

В этом случае уравнение движения без учета массовых внешних сил приобретает вид [1]

$$\rho\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \qquad (1)$$

Поскольку плотность постоянна, то без потери общности ниже полагаем $\rho = 1$.

Принимая определяющие соотношения деформационной теории пластичности (для одноосного напряженного состояния) в следующем виде

$$\sigma = \sigma(\varepsilon), \qquad (2)$$

будем считать, что $\sigma(\varepsilon)$ есть монотонно возрастающая по ε функция (рис. 1) и что для всех ε производная $d\sigma/d\varepsilon$ есть монотонно убывающая функция (т. е. $d^2\sigma/d^2\varepsilon < 0$). Для напряжений $\sigma \leq \sigma_s$ (σ_s – предел текучести) зависимость $\sigma(\varepsilon)$, согласно закону Гука, линейна:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{при} \quad \sigma \leq \sigma_s, \qquad (3)$$

где E – модуль упругости.

Из уравнений сплошности в случае малых деформаций получим соотношение

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dv}{dx}. \qquad (4)$$

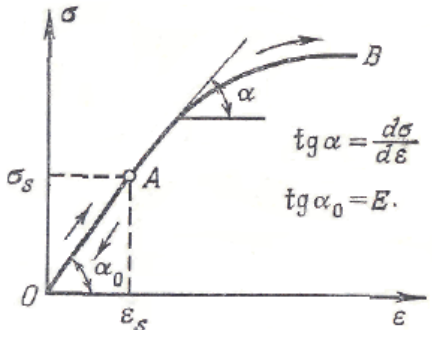


Рис. 1

Учитывая зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ при нагружении и вводя обозначение

$$a^2(\sigma) = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}, \qquad (5)$$

где $d\sigma/d\varepsilon$ – тангенс угла наклона касательной к кривой $\sigma(\varepsilon)$, имеем

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma}\,\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{1}{a^2(\sigma)}\frac{\partial \sigma}{\partial t}. \qquad (6)$$

Подставляя соотношение (4) в (6), получим систему двух уравнений с частными производными первого порядка [1]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\sigma}{dx}\,\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{a^2(\sigma)}\frac{\partial \sigma}{\partial t} \qquad (7)$$

для двух функций $v(x,t), \sigma(x,t)$.

В этом уравнении $a(\sigma)$ есть скорость распространения продольных волн в стержне.

Так как скорость распространения волн в общем случае есть функция напряжения, то система уравнений (7) является системой квазилинейных уравнений с частными производными первого порядка гиперболического типа. Определим для нее характеристики и соотношения на характеристиках.

Характеристики системы уравнений (7) определятся путем интегрирования дифференциальных уравнений характеристик:

$$dx = \mp a(\sigma)dt. \qquad (8)$$

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (№ П1121) и «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1 (3023).

Эти уравнения в общем случае не удается проинтегрировать в плоскости (x, t) до того, как решена задача, так как a есть функция напряжения $\sigma(x,t)$.

Вдоль характеристик $dx = \mp a(\sigma)dt$ выполняются соотношения

$$dv \mp \frac{1}{a(\sigma)} d\sigma = 0. \qquad (9)$$

Эти соотношения носят название дифференциальных уравнений характеристик в плоскости годографа (σ, u). После интегрирования получим

$$v = \mp \int_0^{\sigma} \frac{d\sigma_1}{a(\sigma_1)} + C_{1,2} \text{ при } dx = \mp a(\sigma)dt. \qquad (10)$$

Рассмотрим теперь простейший случай распространения волн нагружения в однородном полубесконечном стержне, находившемся в начальный момент в невозмущенном состоянии.

Определим решение уравнения (7) при заданных начальных условиях (условиях Коши)

$$v = (x,0) = 0 \qquad (11)$$

и краевом условии

$$\sigma(0,t) = -p(t) \quad (p(t) > 0), \qquad (12)$$

причем чтобы обеспечить процесс нагрузки, должно быть $p'(t) > 0$.

Условия (11), (12) означают, что в начальный момент стержень находится в недеформированном состоянии и состоянии покоя. Удовлетворение начальным условиям связано с решением задачи Коши в области (рис. 2), ограниченной осью x и положительной характеристикой t_sQ.

2. Для простоты рассмотрим следующее выражение для функции (2):

$$\sigma = E\varepsilon \text{ при } \sigma \le \sigma_s, \qquad (13)$$
$$\sigma(\varepsilon) = 2\sqrt{\varepsilon}, \text{при } \sigma > \sigma_s.$$

Общий случай рассматривается аналогично.

Для непрерывности функции $\sigma(\varepsilon)$ в точке ε_s полагаем $E = 1/\sqrt{\varepsilon_s}$.

В этом случае плоскость xot разобьется на две области: упругую, ограниченную осью x и прямой t_sQ, и пластической областью, расположенной выше прямой t_sQ. Заметим, что уравнение этой прямой имеет вид $x = a_0(t - t_s)$ (см. рис. 2). В упругой области имеем линейную задачу, которая без труда решается традиционными методами. Поэтому будем искать решение задачи Коши для уравнений (7) только в пластической области.

Постановка задачи. Найти значение функций $v(x,t), \sigma(x,t)$ в точке $M(x_m, t_m)$, если известно значение искомых функций вдоль t_sQ и t_sP. Здесь точки $P(0,t_p), Q(x_q,t_q)$ определяются как точки пересечения соответствующих характеристик, проведенных из точки M. В силу (13) уравнения (7–10) запишутся так:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\sigma}{dt}, \quad \frac{\partial\sigma}{\partial t} = \sigma\frac{\partial v}{\partial x}.$$

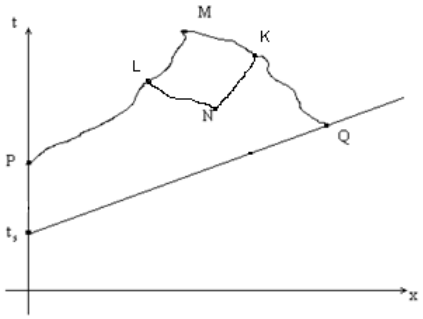


Рис. 2

Характеристики:

$$dx = \mp\sqrt{\sigma}dt.$$

Соотношения на характеристиках

$$dv = \mp\frac{d\sigma}{\sqrt{\sigma}}$$

после интегрирования запишутся в виде

$$v \pm 2\sqrt{\sigma} = C_{1,2}.$$

Введем инварианты Римана по формулам $\xi = v + 2\sqrt{\sigma}, \eta = v - 2\sqrt{\sigma}$, тогда система (7) запишется в виде

$$\xi_t = \sqrt{\sigma}\xi_x, \ \eta_t = -\sqrt{\sigma}\eta_x. \qquad (14)$$

3. Закон сохранения ищем в виде [2]

$$\partial_t A(\xi,\eta) + \partial_x B(\xi,\eta) =$$
$$= (\sqrt{\sigma}A_\xi + B_\xi)\xi_x + (-\sqrt{\sigma}A_\eta + B_\eta)\eta_x = 0.$$

Уравнения для определения A и B:

$$(\sqrt{\sigma}A_\xi + B_\xi) = 0, (-\sqrt{\sigma}A_\eta + B_\eta) = 0 \qquad (15)$$

или

$$2(\xi - \eta)A_{\xi\eta}) - A_\xi + A_\eta = 0. \qquad (16)$$

Заметим, что для функции B мы получаем аналогичное уравнение

$$2(\xi - \eta)B_{\xi\eta}) - B_\xi + B_\eta = 0. \qquad (16^*)$$

С учетом закона сохранения запишем интеграл по замкнутому контуру t_sQMP:

$$\oint_{t_sQMP} Adx - Bdt = \int_{t_sQ} + \int_{QM} + \int_{MP} + \int_{Pt_s} = 0. \qquad (17)$$

Вдоль контуров t_sQ и Pt_s интегралы можно вычислить после определения A, B и с учетом начальных и граничных условий. Определим A, B таким образом, чтобы вдоль QM и MP интегралы были равны нулю.

Имеем

$$\int\limits_{QM} Adx - Bdt = \int\limits_{QM} (-\sqrt{\sigma}A - B)dt = t(-\sqrt{\sigma}A - B)\ \Big|_Q^M + \\ + \int\limits_{QM} td(\sqrt{\sigma}A + B),$$

$$\int\limits_{MP} Adx - Bdt = \int\limits_{MP} (\sqrt{\sigma}A - B)dt = t(\sqrt{\sigma}A - B)\ \Big|_M^P - \\ - \int\limits_{MP} td(\sqrt{\sigma}A - B).$$

Получаем

$$d(\sqrt{\sigma}A + B)\ \Big|_{\xi=\text{const}} = 0,\ d(\sqrt{\sigma}A - B)\ \Big|_{\eta=\text{const}} = 0. \quad (18)$$

С учетом (15) для уравнения (18) получаем

$$\frac{1}{4}A - 2\sqrt{\sigma}A_\eta = 0 \text{ вдоль } QM \text{ при } \xi = \text{const}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{4}A + 2\sqrt{\sigma}A_\eta = 0 \text{ вдоль } MP \text{ при } \eta = \text{const}. \quad (20)$$

Для преобразования условий (19) и (20) заметим следующее. Пусть вдоль линии $\xi = \text{const}$ нам известна функция A, тогда вдоль этой линии нам известна и A_η. Поэтому решая уравнение (19), без труда получаем

$$A = \frac{1}{\sqrt{|\eta - \xi_0|}} \text{ вдоль } QM \text{ при } \xi = \xi_0 = \text{const}. \quad (21)$$

Аналогично из (20) имеем

$$A = \frac{1}{\sqrt{|\xi - \eta_0|}} \text{ вдоль } QM \text{ при } \eta = \eta_0 = \text{const}. \quad (22)$$

Поэтому для определения координаты t_m точки M необходимо решить задачу Гурса (21), (22) для уравнения (16).

Определим x_m из соотношения (17).

Вдоль контуров t_sQ и Pt_s интегралы можно вычислить после определения A, B и с учетом начальных и граничных условий. Определим A, B таким образом, чтобы вдоль QM и MP интегралы были равны нулю.

Имеем

$$\int\limits_{QM} Adx - Bdt = \int\limits_{QM} (-A - B/\sqrt{\sigma})dx = \\ = x(-A - B/\sqrt{\sigma})\Big|_Q^M + \int\limits_{QM} xd(A + B/\sqrt{\sigma}),$$

$$\int\limits_{MP} Adx - Bdt = \int\limits_{MP} (A - B/\sqrt{\sigma})dx = \\ = x(A - B/\sqrt{\sigma})\Big|_M^P - \int\limits_{MP} xd(A - B/\sqrt{\sigma}).$$

Получаем

$$d(A + B/\sqrt{\sigma})\Big|_{\xi=\text{const}} = 0, \\ d(A - B/\sqrt{\sigma})\Big|_{\eta=\text{const}} = 0. \quad (23)$$

С учетом уравнений (15) для уравнения (18) получаем

$$B + 2(\xi - \eta)B_\eta = 0 \text{ вдоль } QM \text{ при } \xi = \xi_0 = \text{const}, \quad (24)$$

$$-B + 2(\xi - \eta)B_\xi = 0 \text{ вдоль } MP \text{ при } \eta = \eta_0 = \text{const}. \quad (25)$$

Решая уравнение (24), без труда получаем новое граничное условие

$$B = \sqrt{|\eta - \xi_0|} \text{ вдоль } QM \text{ при } \xi = \xi_0 = \text{const}. \quad (26)$$

Аналогично из (25) имеем

$$B = \sqrt{|\xi - \eta_0|} \text{ вдоль } QM \text{ при } \eta = \eta_0 = \text{const}. \quad (27)$$

Поэтому для определения координаты x_m точки M необходимо решить задачу Гурса (26), (27) для уравнения (16*).

Для решения этих двух задач воспользуемся функцией Римана для уравнений (16) и (16*). Из свойств функции Римана следует, что для уравнения (16) с условиями на характеристиках (21), (22) и для уравнения (16*) с условиями (26) и (27) она будет одна и та же. Функция Римана имеет следующий вид:

$$\upsilon(\xi_0, \eta_0, \xi, \eta) = (\frac{\xi_0 - \eta_0}{\xi_0 - \eta})^{\frac{1}{2}} (\frac{\xi_0 - \eta_0}{\xi - \eta_0})^{\frac{1}{2}} F(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 1, t), \quad (28)$$

где $1 - t = (\frac{\xi - \eta}{\xi_0 - \eta})(\frac{\xi_0 - \eta_0}{\xi - \eta_0})$; F – гипергеометрическая функция первого рода.

Окончательно получаем значение функции A в точке $N(\xi_1, \eta_1)$:

$$A(N) = A(M)\upsilon(M) + \int\limits_{\xi_1}^{\xi_9} \upsilon(-\frac{A}{2(\xi - \eta)} + A_\xi)d\xi + \\ + \int\limits_{\eta_0}^{\eta_1} \upsilon(\frac{A}{2(\xi - \eta)} + A_\eta)d\eta.$$

Здесь точка M имеет координаты (ξ_0, η_0).

Аналогичная формула будет для B в точке N [3].

Библиографические ссылки

1. Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности. М. : Мир, 1979.

2. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения для решения уравнений механики. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001.

3. Смирнов В. И. Курс высшей математики : в 5 т. Т. 4. Ч. 2. М. : Наука, 1981.

S. I. Senashov

CONSERVATION LAWS IN THE PROBLEM ABOUT PLANE WAVE OF LOADING IN ELASTIC-PLASTIC ROD

In paper was constructed conservation laws for equations of plane wave of loading in elastic-plastic rod. This is given possibility the solve the problem in analytical form.

Keywords: elastic-plastic rod, conservation laws, exact solutions.

© Сенашов С. И., 2011

УДК 519.248:[33+301]

Д. С. Слепов

ОЦЕНИВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КРЕДИТНЫХ ДЕРИВАТИВОВ

Рассматриваются подходы к оцениванию корреляционных кредитных деривативов. Исследована однофакторная модель гауссовской копулы, ставшая рыночным стандартом. Предложен способ моделирования структур зависимостей, основанный на применении широкомультипликативной аппроксимации эвентологических распределений. Произведено сравнение моделей на численном примере.

Ключевые слова: кредитные деривативы, гауссовская копула, эвентология, широкая зависимость, широкомультипликативная аппроксимация.

Примерами корреляционных кредитных деривативов являются обеспеченные долговые обязательства (CDO) и корзинный своп кредитного дефолта. В основе подобных финансовых инструментов лежит портфель из некоторых долговых обязательств, а выплаты по ним зависят от количества дефолтов в портфеле. Подробнее рассмотрим CDO как наиболее популярный.

Предположим, что CDO имеет следующую структуру: портфель из 100 облигаций, который разбит на 3 транша, имеющих разную субординацию и объем [1]. Младший транш имеет номинал 5 % от совокупного номинала портфеля, средний транш – 20 % и старший транш – 75 %. Транши получают денежные потоки, генерируемые базовым портфелем в порядке старшинства. В первую очередь денежный поток обеспечивает обещанную доходность по старшему траншу, во вторую очередь – по среднему траншу. Оставшиеся денежные потоки поступают к младшему траншу. В случае дефолтов в портфеле облигаций первым пострадает младший транш, он аккумулирует все убытки по портфелю, пока они не превысят 5 % от совокупного номинала. Убытки свыше 5 % будет аккумулировать средний транш вплоть до 25 %. Только в случае превышения убытков уровня 25 % старший транш начнет нести потери.

Подобное структурирование портфеля на транши позволяет получить долговые инструменты с различными уровнями риска и доходности. Доходность в данном случае и будет являться ценой транша. Уровень доходности пропорционален ожидаемым убыткам по траншу, поэтому задача оценивания траншей сводится к оценке ожидаемых убытков.

Цену транша определяют несколько параметров (вероятность дефолта, ставка возмещения и др.), однако данная работа фокусируется на корреляции между дефолтами, так как она играет ключевую роль при ценообразовании. Поэтому оценивание траншей CDO требует моделей, которые позволяют фиксировать структуру зависимостей и рассчитывать распределение убытков по портфелю.

Далее рассматривается наиболее популярная однофакторная модель гауссовской копулы, ставшая рыночным стандартом. Затем представляется эвентологическая модель. Приводится численный пример для сравнения моделей.

Однофакторная модель гауссовской копулы. Наиболее распространенным подходом для моделирования коррелированных рисков дефолта является подход с использованием копул. Копула – многомерная функция распределения, связывающая множество маргинальных распределений. В то время как маргинальные распределения описывают индивидуальный риск дефолта каждого актива, копула описывает зависимости между индивидуальными рисками дефолта через многомерное распределение. В частности, популярным практическим инструментом, особенно после работы Ли [2], стала однофакторная модель гауссовской копулы.

Чтобы представить данную модель, рассмотрим гомогенный портфель, состоящий из обязательств N компаний. Определим T_i как момент времени дефолта i-й компании, а $p_i(t) = P(T_i \le t)$ как интегральную риск-нейтральную вероятность того, что компания i допустит дефолт до момента времени t. Поскольку рассматривается гомогенный портфель

$p_i(t) = p(t)$ для всех i, предполагается, что нам известны риск-нейтральные вероятности дефолта. Левый хвост распределения моментов объявления дефолта может быть оценен на основе рыночных цен облигаций.

Используя упрощенный подход Мертона к оценке компаний, предположим, что компания объявляет дефолт в случае, если стоимость активов X_i становиться меньше определенного уровня x (уровня долга), где X_i – случайная величина, имеющая стандартное нормальное распределение.

Далее соотнесем риск-нейтральные вероятности дефолта с вероятностями того, что величина активов компании будет ниже определенного уровня:

$$P(T_i \le t) = P(X_i \le x). \quad (1)$$

Уровень долга x может быть найден как

$$x = N^{-1}[P(T_i \le t)], \quad (2)$$

где N^{-1} – функция, обратная интегральному нормальному распределению.

В рассматриваемой модели предполагается, что

$$X_i = \sqrt{\rho}F + \sqrt{1-\rho}Z_i, \quad (3)$$

где F и Z_i – независимые случайные величины, имеющие стандартное нормальное распределение. Заметим, что правила сложения независимых случайных величин гарантируют, что X_i также имеет стандартное нормальное распределение.

Здесь F – общий фактор, влияющий на дефолты всех компаний, а Z_i – фактор, характерный только для компании i.

В уравнении (3) параметр ρ – коэффициент корреляции гауссовской копулы – может принимать значения между 0 и 1. Он определяет, насколько сильно общий фактор влияет на вероятность дефолта компании и измеряет степень корреляции между величинами активов (ρ – коэффициент корреляции между X_i и X_j, $\forall\, i \ne j$).

Комбинируя (1), (2) и (3), получаем

$$P\left(T_i \le t \mid F = f\right) = N\left[\frac{N^{-1}[P\left(T_i \le t\right) - \sqrt{\rho}f]}{\sqrt{1-\rho}}\right],$$

где $P\left(T_i \le t \mid F = f\right)$ – условная вероятность дефолта, зависящая от значения общего фактора.

Обозначим через $P(k, t)$ вероятность наступления ровно k дефолтов к моменту времени t. Поскольку условные вероятности дефолта независимы, мы можем найти условные вероятности наступления k дефолтов из свойств биномиального распределения:

$$P\left(k,t \mid F = f\right) =$$
$$= C_N^k P^k \left(T_i \le t \mid F = f\right)\left[1 - P\left(T_i \le t \mid F = f\right)\right]^{N-k}.$$

Наконец, чтобы посчитать безусловные значения $P(k, t)$, необходимо проинтегрировать $P(k, t\,|F)$ по стандартному нормальному распределению.

Модель мультипликативной аппроксимации. В данной работе предлагается альтернативный подход для моделирования коррелированных рисков дефолта. Подход основан на использовании аппроксимаций эвентологических распределений широкомультипликативными сет-функциями, которые были предложены в работах Воробьева [3; 4].

В модели мультипликативной аппроксимации каждому обязательству из портфеля соответствует событие дефолта, множество событий дефолтов имеет мощность N, равное количеству обязательств в портфеле.

Рассмотрим эвентологическое пространство (Ω, F, **P**); конечное множество событий $\aleph \subseteq F$, состоящее из $N = |\aleph|$событий и эвентологическое распределение (Э-распределение) множества $\aleph$ в виде набора вероятностей $\{p(X), X \subseteq \aleph\}$, в котором

$$p(X) = \mathbf{P}\left(\bigcap_{x\in X} x \bigcap_{x\in X^c} x^c\right).$$

В эвентологическом распределении содержится всеобъемлющая информация о структуре зависимостей множества событий $\tilde{\aleph}$. В наиболее общей ситуации, когда отсутствует какая-либо форма вероятностной независимости, структура зависимости $\aleph$ определяется максимальной совокупностью из $2^N - 1$ независимого параметра. Любой форме независимости множества событий соответствует способ параметризации распределения, определяемый сокращенной совокупностью параметров.

Для обнаружения, фиксации и применения различных форм независимости используется специальный инструментарий широкомультипликативных проекций и аппроксимаций Э-распределений, которые позволяет описывать структуру зависимости малым количеством параметров.

Известно, что любое полное Э-распределение $\{p(X), X \subseteq \aleph\}$ множества событий $\aleph \subseteq F$ можно связать с соответствующими мультиковариациями $\tau(X)$ формулами мультипликативного обращения Мёбиуса для $X \subseteq \aleph$:

$$p(X) = \prod_{Y\subseteq X} \tau\left(Y\right), \quad (4)$$
$$\tau(X) = \prod_{Y\subseteq X} p\left(Y\right)^{(-1)^{|X|-|Y|}}.$$

Формула (4) может быть переписана в эквивалентном виде:

$$p(X) = \prod_{m=0}^{|\aleph|} \prod_{Y_m\subseteq X} \tau\left(Y_m\right), \quad X \subseteq \aleph, \quad (5)$$

где Y_m – m-подмножества событий из $\aleph$, т. е. $|Y_m| = m$, $m = 0, \ldots, |\aleph|$.

Сет-функции, стоящие в (5) под знаком внешнего произведения, называются широкомультипликативными проекциями сет-функции $p(X)$ и имеют специальное обозначение:

$$p^{[m]}(X) = \prod_{Y_m\subseteq X} \tau\left(Y_m\right),\ X \subseteq \aleph.$$

Сет-функция

$$\hat{p}^{[N_0]}(X)=\frac{\prod_{m=0}^{N_0}p^{[m]}(X)}{\sum_{X\subseteq\aleph}\prod_{m=0}^{N_0}p^{[m]}(X)} \quad (6)$$

имеет название N_0-мультипликативная аппроксимация.

Для $N_0 = 2$ по определению в общем случае имеем

$$\hat{p}^{[2]}(X)=\frac{p^{[0]}(X)p^{[1]}(X)p^{[2]}(X)}{\sum_{X\subseteq\aleph}p^{[0]}(X)p^{[1]}(X)p^{[2]}(X)}= \\ =\frac{\prod_{x\in X}\tau(x)\prod_{\{x,y\}\subseteq X}\tau(xy)}{\sum_{X\subseteq\aleph}\prod_{x\in X}\tau(x)\prod_{\{x,y\}\subseteq X}\tau(xy)}. \quad (7)$$

В рассматриваемом случае мы имеем дело с симметричными событиями, что соответствует гомогенному портфелю. Используя свойства симметричных событий [5], формулу (7) можно упростить:

$$\hat{p}^{[2]}(X_k)=\frac{\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}{\sum_{k=0}^{N}\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}, \quad (8)$$

где $|X_k| = k$, $k = 0, \ldots, |\aleph|$. Полученная сет-функция определяет аппроксимированное Э-распределение через $\tau(Y_1)$ и $\tau(Y_2)$, которые могут быть найдены в результате решения системы уравнений [6]:

$$\begin{cases}\dfrac{\sum_{k=1}^{N}C_{N-1}^{k-1}\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}{\sum_{k=0}^{N}C_N^k\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}=p_{X_1},\ |X_1|=1,\\ \dfrac{\sum_{k=2}^{N}C_{N-2}^{k-2}\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}{\sum_{k=0}^{N}C_N^k\tau^k(Y_1)\tau^{C_k^2}(Y_2)}=p_{X_2},\ |X_2|=1,\end{cases} \quad (9)$$

в которой $p_X=\mathbf{P}\left(\bigcap_{x\in X}x\right)$. Параметр p_{X_1} равен риск-нейтральной вероятности дефолта, а параметр p_{X_2} является аналогом ρ и определяет степень зависимости событий.

Решив систему (9) численными методами, рассчитать вероятность наступления ровно k дефолтов можно как $p(k)=C_N^k\hat{p}^{[2]}(X_k)$.

Численный пример. Для того чтобы сравнить модели, рассмотрим следующий численный пример. Рассчитаем ожидаемые убытки $E[L]$ по траншам CDO, которые были описаны в первой секции. Предположим, что риск-нейтральная вероятность дефолта каждой облигации в течение года равна 1 %, а ставка возмещения – 50 %. Размер ожидаемых убытков для разных траншей определяется как

$$E[L_{\text{junior}}]=1-\sum_{k=0}^{10}\left(\frac{5-0,5k}{5}\right)p(k),$$

$$E[L_{\text{mezzanine}}]=1-\left(\sum_{k=0}^{10}p(k)+\sum_{k=11}^{50}\left(\frac{25-0,5k}{20}\right)p(k)\right),$$

$$E[L_{\text{senior}}]=1-\left(\sum_{k=0}^{50}p(k)+\sum_{k=75}^{100}\left(\frac{100-0,5k}{75}\right)p(k)\right).$$

Рассчитаем ожидаемые потери при различных уровнях корреляции (см. таблицу). Во втором столбце показаны ожидаемые потери в долях единицы для разных траншей при уровнях ρ, равных 0,15; 0,3 и 0,45, рассчитанных в рамках модели гауссовской копулы. Результаты эвентологической модели отражены в третьем столбце. Уровни p_{X_2} выбирались таким образом, чтобы ожидаемые потери младших траншей совпадали с оценкой стандартной модели. Из данных таблицы видно, что эвентологическая модель недооценивает ожидаемые убытки по средним траншам CDO по сравнению с однофакторной моделью гауссовской копулы, а по старшим траншам – переоценивает.

Ожидаемые потери при различных уровнях корреляции

	Стандартная модель	Эвентологическая модель
	ρ = 0,15	p_{X_2} = 0,000 256
$E[L_{\text{junior}}]$	0,099 22	0,099 22
$E[L_{\text{mezzanine}}]$	0,000 19	0,000 09
$E[L_{\text{senior}}]$	0,000 00	0,000 03
	ρ = 0,03	p_{X_2} = 0,000 554
$E[L_{\text{junior}}]$	0,093 29	0,093 29
$E[L_{\text{mezzanine}}]$	0,001 67	0,000 75
$E[L_{\text{senior}}]$	0,000 00	0,000 25
	ρ = 0,45	p_{X_2} = 0,001 06
$E[L_{\text{junior}}]$	0,082 30	0,082 30
$E[L_{\text{mezzanine}}]$	0,004 36	0,001 99
$E[L_{\text{senior}}]$	0,000 02	0,000 65

Итак, предложен новый подход к моделированию коррелированных рисков дефолта. Построена эвентологическая модель мультипликативной аппроксимации, которая является аналогом однофакторной модели гауссовской копулы. С помощью численного примера произведено сравнение моделей.

Показано, что предложенная модель может быть использована для оценивания траншей CDO. Однако перспективы практического использования эвентологической модели зависят от двух факторов. Первый – это степень согласованности модели при одновременном оценивании разных траншей с рыночными ценами. Известно, что модель гаусовской копулы не обеспечивает адекватного решения при одновременном оценивании разных траншей, что приводит к «улыбке корреляции». Для эвентологической модели это предстоит выяснить в эмпирических исследованиях. Второй фактор – это простота имплементации модели. Здесь есть проблема с решением системы (9). При

большом N в процессе вычисления возникают очень маленькие и очень большие числа. Эмпирически выявлено, что данный факт не мешает получать решения вплоть до $N = 125$. Однако с ростом N данная проблема может стать непреодолимой.

Библиографические ссылки

1. Hull J. C. Options, Futures, and Other Derivatives. 7th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2008.

2. Li D. X. On default correlation: copula approach // J. of Fixed Income. 2000. № 9. P. 43–54.

3. Воробьев О. Ю. Эвентология / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2007.

4. Воробьев О. Ю. Широкая зависимость событий и аппроксимация эвентологических распределений широкомультипликативными сет-функциями // Тр. VIII ФАМ-конф. Красноярск, 2009. С. 101–122.

5. Воробьев О. Ю. Теоретические основания эвентологии. Структуры симметричных событий // Тр. II ФАМ-конф. Красноярск, 2003. С. 69–113.

6. Слепов Д. С. Один способ моделирования структур зависимостей симметричных событий // Тр. IX ФАМЭТ конф. Красноярск, 2010. С. 281–283.

D. S. Slepov

VALUATION OF CORRELATION-DEPENDENT CREDIT DERIVATIVES

This paper addresses the pricing of correlation-dependent credit derivatives. We first examine the one-factor Gaussian copula model that has become the market standard. Then we present a new approach to model parametrically a dependence structure. Our approach is based on using a multiplicative approximation. Eventually, we use a numerical example to compare these models.

Keywords: credit derivatives, default correlation, Gaussian copula, eventology, wide dependence of events, multiplicative approximation.

© Слепов Д. С., 2011

УДК 004.932.2

И. В. Тупицын

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СТЕРЕОПАРЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложен алгоритм построения трехмерной модели сцены по стереоснимкам. Алгоритм состоит из конечного числа шагов. На первом этапе выполняется поиск соответствующих точек. На втором этапе производится вычисление их трехмерных координат. Третий этап подразумевает выполнение триангуляции для полученного облака точек. На основе предложенного алгоритма реализован программный продукт.

Ключевые слова: стереоизображение, эпиполярная геометрия, соответствующие точки, диспарантность, триангуляция.

В настоящее время большой популярностью пользуется объемное представление данных. Для отображения объемных объектов необходимо построение их трехмерных моделей. Построение моделей вручную сопряжено с большими затратами, а применение специальной аппаратуры для сканирования трехмерных объектов не всегда возможно, так как глубина сканирования такими устройствами ограничена. Поэтому при построении моделей используются несколько ракурсов воспроизводимой сцены. Как правило, имеется лишь два ракурса. В статье приводятся способы получения трехмерной модели сцены по стереопаре, т. е. парой плоских изображений одного и того же объекта, полученных с немного различающихся позиций. Для построения трехмерной модели сцены необходимо найти пространственные координаты точек, принадлежащих поверхностям объектов воспроизводимой сцены. Исходными данными является стереопара. Также в некоторых случаях могут быть использованы опорные точки, т. е. точки, для которых пространственные координаты известны. Наличие опорных точек позволяет устранить неоднозначности конструкции [1].

Перед вычислением пространственных координат необходимо произвести сопоставление изображений стереопары, т. е. поиск точек на левом и правом изображениях, соответствующих одной и той же области трехмерного пространства. Существует два различных метода сопоставления изображений. Первый метод основан на поиске характерных признаков изображенных объектов (границ, угловых точек и т. д.). Недостатком данного метода при реконструкции трехмерных объектов является ограниченность множества точек, для которых производится восстанов-

ление. Такой метод дает приемлемые результаты, когда реконструируемые объекты имеют достаточно простую форму, что встречается, например, в задачах реконструкции архитектурных сцен. В случае более сложных объектов этот метод не дает необходимого уровня детализации для получения высокореалистичной модели и, как правило, применяется на этапе подготовки изображений для обработки их алгоритмами построения плотной карты диспарантности. Другой метод сопоставления изображений – построение карты диспарантности. В этом случае для каждой точки одного изображения ищется соответствующая ей точка на другом изображении, либо выясняется, что соответствующей точки нет. Этот метод позволяет восстанавливать более мелкие детали объектов.

Общий алгоритм построения трехмерной модели сцены по стереоснимкам. Предположим, что стереопара ректифицирована, т. е. выполнены следующие условия:

а) строки изображения параллельны стереобазе (рис. 1);

б) эпиполярные линии совпадают со строками изображения;

в) соответствующие точки лежат на одной строке изображения.

Тогда алгоритм восстановления трехмерной сцены по стереопаре будет включать в себя следующие этапы:

1. Поиск соответствующих точек на изображениях.

2. Вычисление пространственных координат точек объектов восстанавливаемой сцены.

3. Построение трехмерной модели сцены (триангуляция).

Рассмотрим каждый из этапов.

Поиск соответствующих точек на изображениях. Использование особых точек на изображениях позволяет получить лишь небольшое количество точек поверхности сцены. Для реконструкции всей сцены можно использовать интерполяцию, но это зачастую не приводит к удовлетворительным результатам, так как теряются мелкие детали сцены. Существует большое количество алгоритмов, позволяющих находить соответствующие точки практически для всех точек стереопары (кроме тех точек, для которых не нашлось соответствия).

Все алгоритмы построения карты диспарантности делятся на локальные алгоритмы (в которых расхождение вычисляется в каждой точке на основе «похожести» окна вокруг этой точки и окна вокруг точек на другом изображении) и глобальные алгоритмы (основанные на минимизации функционала энергии – находится расхождение сразу для всех точек). Глобальные в свою очередь делятся по способу минимизации энергии. Как правило, это динамическое программирование [2] или нахождение минимального размера графа [3–5]. Алгоритмы разреза графа называют также двумерными алгоритмами. Они дают довольно точные результаты, но имеют меньшую производительность. Алгоритмы, обрабатывающие строки изображений независимо друг от друга, называют одномерными алгоритмами. Они работают быстрее, но подвержены эффекту гребенки, с которым борются различными способами. Нечто среднее по производительности и качеству представляют собой алгоритмы оптимизации на поддереве графа, построенного на пикселях изображения.

Рассмотрим подробнее одномерный метод поиска соответствующих точек, использующий DSI (*disparity space image*) [2]. Пусть s_i и s'_i – соответствующие i-е строки левого и правого изображений, $I(x,y)$ и $I'(x,y)$ – соответствующие функции интенсивности. Тогда параметр DSI_i вычисляется как разность интенсивностей:

$$\mathrm{DSI}_i(x,d) = \left\| I(x,i) - I'(x-d,i) \right\|,$$

где N – ширина картинки; $d_{\max}$ – максимальное допустимое расхождение на изображении; при этом выполняются условия $-d_{\max} \le d \le d_{\max}$ и $0 \le (x+d) \le N$.

Другим способом построения DSI_i является вычисление величины, основанной на корреляции функций интенсивностей вокруг пикселей (x,i) и $(x-d,i)$. При этом размеры окна выбираются адаптивно (например, если точка находится на границе объектов, то окно с центром в этой точке будет плохим, лучше использовать окно, которое полностью принадлежит одному объекту). Далее отбрасываем строки DSI_i, которые соответствуют заведомо невозможным значениям d (например, из условий, что пиксель на левом изображении должен быть правее соответствующего ему на правом, из условия $|d| \le d_{\max}$).

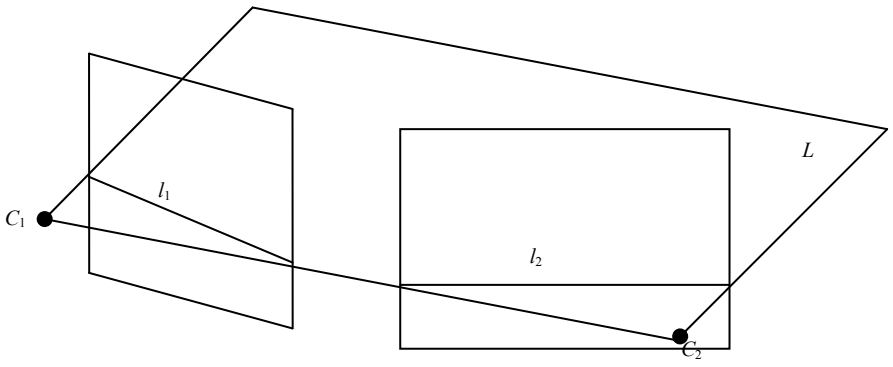


Рис. 1. Эпиполярная геометрия:
L – эпиполярная плоскость; l_1, l_2 – эпиполярные линии; C_1, C_2 – центры камер

Задача сводится к поиску оптимального пути на полученной двумерной матрице. При этом за каждый тип движения назначается определенный штраф. Используются типы движения по горизонтали, вертикали и по диагонали. Последние два типа соответствуют заслоненным областям (присутствующим только на одном из изображений стереопары). Отметим, что если некоторая поверхность на левом изображении имеет ширину 9 пикселей, а на правом – 3 пикселя, то в этой терминологии трем пикселям из изображения слева соответствуют 3 пикселя справа (это могут быть, например, третий, шестой и восьмой), остальные 6 пикселей считаются заслоненными.

Задача решается методом динамического программирования. Если на изображении заранее известны GCP-точки (*ground control points* – точки, положение и соответствие которых мы можем определить достаточно точно), то количество возможных путей сокращается за счет использования следующего ограничения. Путь должен проходить так, чтобы он не противоречил расстановке базовых GCP-точек. Возможны также многозначные GCP-точки, когда точке одного изображения может соответствовать одна точка из небольшого набора вариантов на другом изображении.

Вычисление пространственных координат точек. Процесс построения трехмерной модели по множеству пар соответствующих точек в общем случае состоит из трех этапов:

– вычисления фундаментальной матрицы;

– вычисления матриц камер по фундаментальной матрице;

– вычисления для каждой пары сопряженных точек точки в пространстве, изображением которой эти точки являются.

Зная матрицы камер (**P** и **P′**) и координаты изображений точки для каждой камеры (**x** и **x′**), можно вычислить пространственные координаты **X** данной точки как решение системы уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}; \\ \mathbf{x}' = \mathbf{P}'\mathbf{X}. \end{cases} \quad (1)$$

Так как используются однородные координаты, равенство в системе уравнений (1) подразумевается с точностью до ненулевого множителя. На практике координаты точек могут быть заданы с некоторой погрешностью и поэтому система (1) может не иметь точного решения.

Для нахождения координат **X** система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \mathbf{x} \times (\mathbf{P}\mathbf{X}) = 0; \\ \mathbf{x}' \times (\mathbf{P}'\mathbf{X}) = 0, \end{cases}$$

где знаком «×» обозначают векторное произведение, что равносильно системе уравнений

$$\begin{bmatrix} x\mathbf{p}^{3T} - \mathbf{p}^{1T} \\ y\mathbf{p}^{3T} - \mathbf{p}^{2T} \\ x'\mathbf{p}^{3T} - \mathbf{p}'^{1T} \\ y'\mathbf{p}'^{3T} - \mathbf{p}'^{2T} \end{bmatrix} \mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{0}.$$

Здесь $\mathbf{p}^{iT}$ и $\mathbf{p}'^{iT}$ – строки матриц **P** и **P′**; $\mathbf{x} = (x, y, 1)$, $\mathbf{x}' = (x', y', 1)$. В качестве оценки **X** принимается значение сингулярного вектора, соответствующего наименьшему сингулярному значению матрицы **A**.

Когда для реконструкции используются только изображения (а именно множество сопряженных точек), возникает неоднозначность реконструкции: пространственные координаты могут быть определены лишь с точностью до проективного преобразования.

На основании теоремы о существовании матрицы преобразования одной реконструкции в другую для одних и тех же множеств соответствующих точек [6] можно сделать вывод, что без какой-либо информации о параметрах камер и реконструируемого объекта можно выполнить реконструкцию с точностью до проективного преобразования. Используя дополнительную информацию, можно сократить неоднозначность. Так, например, указав на изображении проекции трех множеств параллельных прямых с разными направлениями, можно сократить неоднозначность до аффинного преобразования. В случае если известны внутренние параметры камер, реконструкция возможна с точностью до преобразования подобия.

Рассмотрим случай, когда известны n опорных точек (т. е. точек, для которых заданы пространственные координаты) $\{\mathbf{X}_{Ei}\}$ и их изображения $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}_i'$. В данном случае, используя координаты соответствующих точек $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}_i'$, можно восстановить их координаты в пространстве $\{\mathbf{X}_i\}$, которые, в силу приведенной выше теоремы, будут связаны с истинными координатами проективным преобразованием **H**:

$$\mathbf{X}_{Ei} = \mathbf{H}\mathbf{X}_i, \quad i = 1, ..., n. \quad (2)$$

Каждая пара $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}_i'$ дает три линейно независимых уравнения относительно элементов **H**. Таким образом, для решения системы (2) необходимо не менее пяти пар, причем никакие четыре опорные точки не должны быть компланарны. В случае $n \geq 6$ система (2) может не иметь точного решения из-за погрешностей измерения координат точек. В этом случае решение **H** может быть получено путем минимизации алгебраической или геометрической ошибки [6].

Триангуляция. Одним из самых распространенных способов триангуляции является триангуляция Делоне. Триангуляцией Делоне для множества точек S (иногда именуемых сайтами) на плоскости называют триангуляцию $DT(S)$ такую, что никакая точка A из S не содержится внутри окружности, описанной вокруг любого треугольника из $DT(S)$ такого, что ни одной из вершин его не является точка A [7]. В работе [8] предлагается гибридный рекурсивно-инкремент-ный алгоритм построения триангуляции Делоне, позволяющий избежать недостатков рекурсивного и инкрементного алгоритмов. В нашем случае для построения триангуляции Делоне необходимо спроецировать множество точек на плоскость.

В качестве предобработки построим на множестве S выпуклую оболочку $CH(S)$, каждое из ребер оболочки сделаем ориентированным с учетом обхода по

часовой стрелке. Определим медианы по абсциссе X_M и ординате Y_M по формулам

$$X_M = \left(\sum_{i=1}^{N} X_i \right) / N;$$

$$Y_M = \left(\sum_{i=1}^{N} Y_i \right) / N.$$

Проведем горизонтальную и вертикальную прямые X_M = const и Y_M = const. Найдем точки пересечения этих прямых с соответствующими ребрами выпуклой оболочки. Сравнив расстояния по вертикали и горизонтали и учитывая предположение о случайности набора точек, за базовую возьмем прямую, для которой расстояние между точками пересечения меньше. Это позволит быстрее разделить исходное множество на два подмножества. Дальнейшую схему покажем на примере горизонтальной базовой прямой (рис. 2).

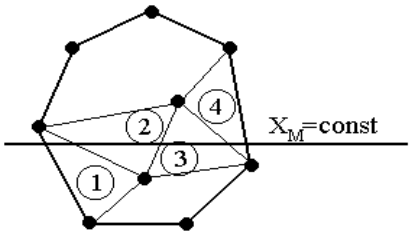


Рис. 2. Последовательность выделения разделяющей цепи выбранных треугольников

Предварительно все непересекаемые ребра оболочки, расположенные выше X_M, заносим в список ребер верхней оболочки, а точки, как внутренние, так и граничные, расположенные выше X_M, в верхний список точек; непересекаемые и расположенные ниже X_M ребра оболочки заносим в список ребер нижней оболочки, а все точки, расположенные ниже X_M, помещаем в нижний список точек. В качестве первого исследуемого ребра используем левое ребро выпуклой оболочки такое, которое пересекает базовая прямая. По методу, описанному в работе [8], находим подходящую точку, определив тем самым треугольник 1. Если прямая X_M пересекает условную верхнюю сторону, как показано на рис. 2, то она используется для продолжения построения цепи разделяющих треугольников. Нижнее непересекаемое прямой X_M ребро добавляется в список нижней оболочки. Совершенно аналогично, как это показано для треугольника 2, условно нижнее ребро используется для последующего определения треугольника 3, а верхнее непересекаемое прямой X_M ребро добавляется в список верхней оболочки. Точки, участвующие в цепи разделяющих треугольников, исключаются из соответствующих верхнего и нижнего списков точек.

Построение разделяющей цепи треугольников, что считается единым проходом алгоритма, заканчивается, когда второе ребро пересекаемого треугольника совпадает с правым ребром оболочки, пересекаемой прямой X_M. На рис. 2 это случилось для треугольника 4. В результате первого прохода построена цепь разделяющих треугольников Делоне 1, 2, 3, 4 и подготовлены данные для следующих проходов алгоритма.

Рекурсивным окончанием разделения точек служит либо отсутствие оставшихся точек в условно верхнем или нижнем списке точек, либо наличие 3 оставшихся точек в таком списке, что образует последний треугольник. Ввиду очевидной простоты, можно предусмотреть модификацию окончания рекурсивного деления, если остаются 4 точки в списке.

Программная реализация. Обобщим описанные выше методы и представим в виде обобщенного алгоритма реконструкции трехмерной модели сцены на основе стереопары (рис. 3).

Данный алгоритм был программно реализован с использованием языка программирования C++ и показал хорошие результаты при реконструкции трехмерных сцен.

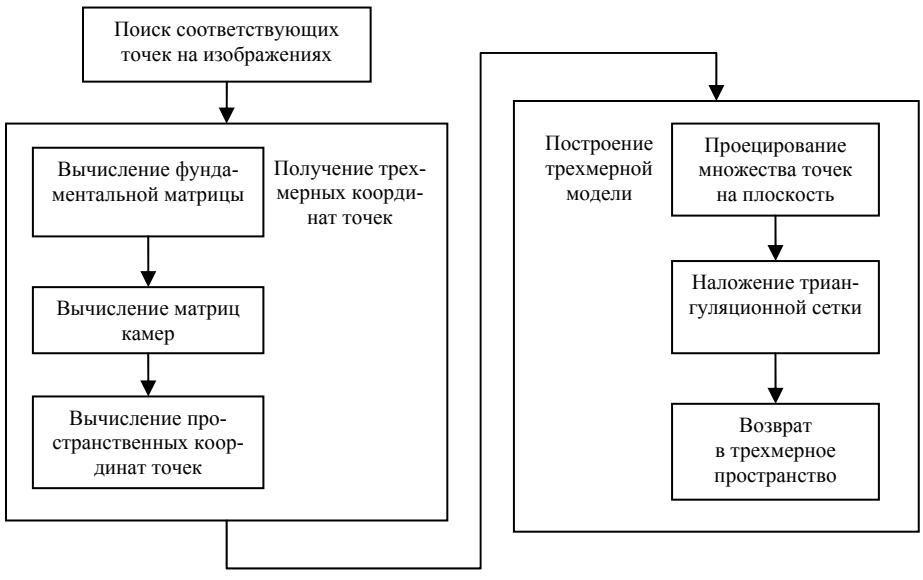


Рис. 3. Обобщенный алгоритм реконструкции трехмерной модели сцены на основе стереопары

Итак, в работе рассмотрены этапы процесса реконструкции трехмерной модели по нескольким изображениям, который, используя только информацию, содержащуюся на самих изображениях, позволяет получить детализированную модель реконструируемого объекта. Детализация модели достигается за счет использования плотных карт диспарантности для поиска соответствующих точек. По большей части от выбора алгоритма построения плотной карты диспарантности зависит время, затрачиваемое на получение модели, а также точность реконструкции.

Полученная таким образом модель может быть привязана к исходному объекту при помощи небольшого числа опорных точек. Дальнейшая изыскательская работа позволит оптимизировать процесс построения трехмерных моделей по стереоизображениям. Программная реализация и внедрение алгоритмов построения трехмерной модели сцен по стереоизображениям с использованием возможностей параллельных систем позволит в значительной степени автоматизировать работы по обработке данных, полученных при дистанционном зондировании Земли, а также работы по оперативному построению трехмерных моделей реальных объектов.

Библиографические ссылки

1. Жук Д. В., Тузиков А. В. Реконструкция трехмерной модели по двум цифровым изображениям // Информатика. 2006. № 1. С. 16–26.

2. Veksler O. Stereo correspondence by dynamic programming on a tree // Proc. CVPR. 2005. Vol. 2. P. 384–390.

3. Naveed I. R., Huijun Di, Guang You Xu. Refine stereo correspondence using bayesian network and dynamic programming on a color based minimal span tree // ACIVS. 2006. P. 610–619.

4. Kolmogorov V., Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts // ICCV. 2001. Vol. 2. P. 508–515.

5. Boykov Y., Veksler O., Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts // IEEE TPAMI. 2001. № 23(11). P. 1222–1239.

6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge, U. K. : Cambridge Univ. Press, 2001.

7. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение: современный подход. М. : Вильямс, 2004.

8. Синицын С. И. Гибридный рекурсивно-инкрементный алгоритм построения триангуляции Делоне // Материалы конф. «Graphicon». Н. Новгород, 2006. С. 175–177.

I. V. Toupitsyn

RECONSTRUCTION OF THREE DIMENSIONAL MODEL OF THE OBJECT BY STEREOPAIR FOR SOLVING 3D MODELLING TASKS

A 3D model scene building algorithm by stereopair is presented. The algorithm includes three steps. On the first step the search of corresponding points is performed. On the second step three dimensional coordinates of found corresponding points are calculated. And on the third step triangulation for three dimensional points are made. On the basis of the proposed algorithm is implemented software product.

Keywords: stereoimage, epipolar geometry, the corresponding points, disparity, triangulation.

© Тупицын И. В., 2011

УДК 539.3+539.4

Н. А. Федорова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ КОНСТРУКЦИЙ СО СЛОЖНЫМИ КРИВОЛИНЕЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ АРМИРОВАНИЯ

Для определения предельных деформаций плоских конструкций с криволинейными траекториями армирования в рамках плоской задачи получены разрешающие уравнения для линейной ортотропной неоднородной задачи упругости. Многообразие структур армирования на базе ортогональных систем координат достигается построением изогональных траекторий к данным координатным линиям.

Ключевые слова: армирование, структурная модель, изогональные траектории.

Для безопасной работы конструкций с концентраторами напряжений, в окрестности которых возникают большие градиенты полей напряжений, что часто встречается в авиационных конструкциях, их армируют высокопрочными волокнами с целью восприятия волокнами этих градиентов. Но волокна могут и не выполнить эту роль, тогда нагрузка будет влиять на связующее. До последнего времени армирование плоских конструкций осуществлялось прямолинейными волокнами. Однако такая структура армирова-

ния может быть эффективной лишь в частных случаях нагружения, при которых внутренние силовые потоки преимущественно направлены вдоль траекторий армирования. Реальные конструктивные элементы работают в более сложных условиях нагружения. Для таких конструкций нужно вводить специальные структуры армирования, которые в определенной мере были бы согласованы с характером полей градиентов напряжений, проводить поиск структур армирования, которые снижают нагрузки, действующие на конструкцию.

На основе структурной модели [1] в работах [2–6] рассмотрены сложные структуры армирования по криволинейным ортогональным траекториям.

Влияние сложного нагружения на распределение силовых линий полей напряжений иллюстрирует следующая задача об эксцентрическом кольце. В данной работе на основе представления решения в виде тригонометрического ряда [7] по криволинейным координатам биполярной системы (ξ,η)получены следующие результаты для неравномерно нагруженного эксцентрического кольца. Для неравномерной нагрузки на граничном контуре вида $\mathrm{const}+\cos\alpha^*\eta$ (α^* – заданная амплитуда) контурные графики для компонент напряжений $\sigma_\xi,\sigma_\eta,\sigma_{\xi\eta}$ в биполярной системе координат приведены на рис. 1–3.

Многообразие структур армирования на базе ортогональной системы координат достигается построением изогональных траекторий к данным координатным линиям. Детерминантным методом в каждом случае устанавливается тип разрешающих систем дифференциальных уравнений, ставится соответствующая краевая задача.

Определение изогональных траекторий. Изогональная траектория – это плоская линия, пересекающая все кривые заданного на плоскости однопараметрического семейства под одним и тем же углом α. Углы β_1 и β наклона траектории и кривой к оси OX связаны соотношением $\beta_1=\beta\pm\alpha$.

Если однопараметрическое семейство плоских кривых задано в виде уравнения

$$F(x,y,a)=0, \tag{1}$$

(где a – параметр), то изогональные траектории строятся из уравнения

$$\frac{\dfrac{\partial F(x_1,y_1,a)}{\partial y_1}\dfrac{dy_1}{dx_1}+\dfrac{\partial F(x_1,y_1,a)}{\partial x_1}}{\dfrac{\partial F(x_1,y_1,a)}{\partial y_1}-\dfrac{\partial F(x_1,y_1,a)}{\partial x_1}\dfrac{dy_1}{dx_1}}=k, \tag{2}$$

где $k=\mathrm{tg}\,\alpha$ – известное значение; α – фиксированный угол, под которым изогональная траектория пересекает все кривые заданного на плоскости однопараметрического семейства. Исключая a из двух последних уравнений, получим соотношение, связывающее координаты x_1,y_1 точки изогональной траектории и угловой коэффициент касательной k, т. е. дифференциальное уравнение изогональных траекторий семейства (1). Общий интеграл полученного уравнения дает семейство от одного параметра изогональных траекторий [8].

Рассмотрим примеры построения изогональных траекторий к данным координатным линиям.

1. В биполярной системе координат (ξ,η) координатные линии $\xi=\xi_0=\mathrm{const}$ представляют собой эксцентрические окружности с центрами на оси OX:

$$(x-a\,\mathrm{cth}\,\xi_0)^2+y^2=\frac{a^2}{(\mathrm{sh}\,\xi_0)^2}. \tag{3}$$

Координатные линии $\eta=\eta_0=\mathrm{const}$ – дуги окружностей с центрами на оси OY и проходящие через две точки $x=\pm a$ (полюсы):

$$x^2+(y+a\,\mathrm{ctg}\,\eta_0)^2=\frac{a^2}{(\sin\,\eta_0)^2}. \tag{4}$$

После введения соответствующей каждому из уравнений (3), (4) линейной замены координат приведем их к уравнению однопараметрического семейства окружностей вида

$$x^2+y^2-b^2=0,$$

где b – параметр семейства, переобозначения координат не проводим. Для данного уравнения построим семейство изогональных траекторий, следуя (2) [8]. Получим для точек x_1,y_1, лежащих на траектории, дифференциальное уравнение

$$\frac{\dfrac{dy_1}{dx_1}+\dfrac{x_1}{y_1}}{1-\dfrac{x_1}{y_1}\dfrac{dy_1}{dx_1}}=k. \tag{5}$$

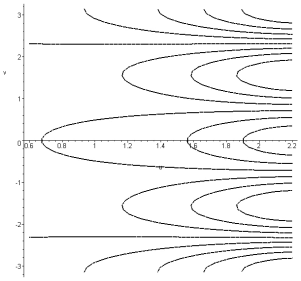


Рис. 1

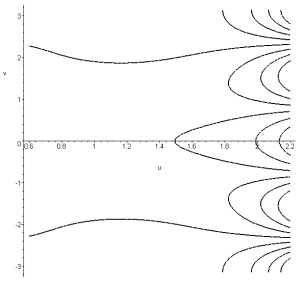


Рис. 2

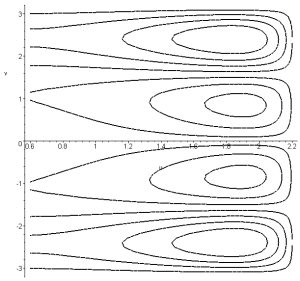


Рис. 3

После преобразований уравнение (5) запишем как однородное дифференциальное уравнение, его решение имеет вид

$$C\sqrt{x_1^2+y_1^2}=e^{k\,\mathrm{arctg}\frac{x_1}{y_1}}, \qquad (6)$$

где C – произвольная константа. Каждому семейству окружностей соответствует свое семейство изогональных траекторий в виде семейства спиралей (6).

2. В эллиптической системе координат координатными линиями являются ξ -эллипсы и η -гиперболы:

$$\frac{x^2}{a^2\mathrm{ch}^2\,\xi}+\frac{y^2}{a^2\mathrm{sh}^2\,\xi}=1 \text{ и } \frac{x^2}{a^2\cos^2\eta}-\frac{y^2}{a^2\sin^2\eta}=1, \qquad (7)$$

где $2a$ – фокусное расстояние. Связь между декартовыми $(x,\ y)$ и эллиптическими координатами (ξ,η) дается формулами

$$x=a\,\mathrm{ch}\,\xi\cos\eta,\ y=a\,\mathrm{sh}\,\xi\sin\eta. \qquad (8)$$

Запишем (7) как однопараметрическое семейство кривых и построим, следуя (2), соответствующее семейство изогональных траекторий. Введем параметр $b^2=a^2\mathrm{ch}\,\xi$, тогда однопараметрическое семейство запишем в виде

$$\frac{x^2}{b^2}+\frac{y^2}{b^2-a^2}=1. \qquad (9)$$

Семейство изогональных траекторий проще находить, если известно дифференциальное уравнение исходного однопараметрического семейства кривых. Чтобы получить дифференциальное уравнение заданного семейства плоских кривых, необходимо продифференцировать (7), затем из полученного уравнения и уравнения семейства исключить параметр b. В итоге получим дифференциальное уравнение семейства

$$xy(y')^2+y'(x^2-y^2-a^2)-xy=0\,. \qquad (10)$$

При рассмотрении семейства гипербол его дифференциальное уравнение совпадает с (10), но при этом параметры плоских кривых удовлетворяют условию $a^2<b^2-a^2<0$ [8]. Для семейств эллипсов и гипербол получим в соответствии с изложенным выше способом дифференциальное уравнение изогональных траекторий

$$\begin{aligned}&x_1y_1(y_1'-k)^2+(y_1'-k)(ky_1'+1)\times\\&\times(x_1^2-y_1^2-a^2)-x_1y_1(ky_1'+1)^2=0.\end{aligned} \qquad (11)$$

Разрешая (11) относительно y_1', получим два дифференциальных уравнения первого порядка. Представим его форму после ввода промежуточных обозначений. Пусть

$$\begin{aligned}S1&=-k^2+x_1^2-y_1^2-a^2+k^2y_1^2+a^2k^2-4x_1y_1,\\S2&=a^4-2ax_1^2+k^4x_1^4+2k^2x_1^4-2ak^4x_1^2+2x_1^2y_1^2+\\&+2y_1^4k^2+k^4y_1^4+2ak^4y_1^2+4k^2x_1^2y_1^2+2k^4x_1^2y_1^2+\\&+x_1^4+y_1^4+a^2k^2y_1^2-a^2k^2x_1^2+2a^2y_1^2+2a^4k^2+a^4,\end{aligned}$$

тогда искомые уравнения запишем в виде

$$y_1'=\frac{S1\pm\sqrt{S2}}{2(ky_1^2+a^2k+x_1y_1k^2-x_1y_1-kx_1^2)}. \qquad (12)$$

Иллюстрации изогональных траекторий к рассмотренным семействам эллипсов представлены на рис. 4 ($k=1$) для $\alpha=\frac{\pi}{4}$, $k=\mathrm{tg}\alpha$. Из вида уравнения (12) следует, что при построении изогональных траекторий могут возникнуть зоны сингулярности для определенных значений k и размеров плоской конструкции. При технологическом конструировании изделий всегда можно выбрать соответствующие размеры вне зоны сингулярности. Иллюстрации изогональных траекторий к рассмотренным семействам гипербол приведены на рис. 5–6 для $k=1$ и $k=0{,}1$ соответственно. Пример изогональных траекторий к семейству парабол вида $y=a\,x^2$ показан на рис. 7 для $k=3$.

Как видим, уравнения изогональных траекторий содержат параметр k, при изменении значения которого имеем множество разнообразных траекторий. Располагая армирующие семейства волокон вдоль найденных траекторий, получаем разнообразную структуру армирования, при управлении которой можно перераспределять поля напряжений и деформаций внутри пластины.

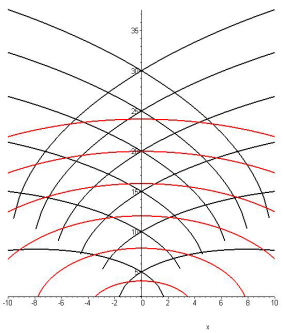


Рис. 4

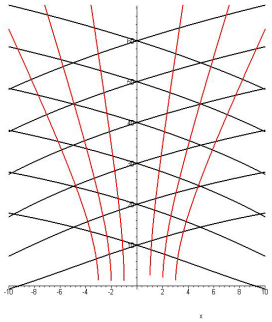


Рис. 5

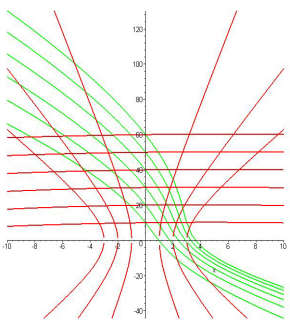


Рис. 6

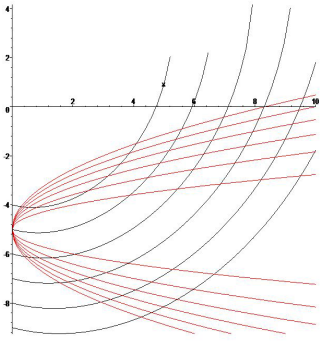


Рис. 7

Изогональные траектории в полярной системе координат. Пусть задана полярная система координат (ρ,θ). Запишем соотношение (2), отражающее геометрическое определение изогональных траекторий, связывающее направления траекторий и направления семейства, в полярной системе координат. Учтем, что тангенс угла μ между полярным радиусом и касательной в фиксированной точке для любой линии, заданной уравнением $\rho=\rho(\theta)$ в полярных координатах, запишется как $\operatorname{tg}\mu=\frac{\rho}{\rho'}$. Последняя формула выражает геометрический смысл производной функции $\rho=\rho(\theta)$. Тогда соотношение (2), соответствующее полярной системе координат, запишем в виде

$$\frac{\rho'}{\rho}=\frac{k\frac{\rho_1}{\rho_1'}+1}{\frac{\rho_1}{\rho_1'}-1}, \qquad (13)$$

где $k=\operatorname{tg}\alpha$, $\alpha\neq\pi/2$ – постоянный угол, под которым данное семейство пересекается семейством изогональных траекторий.

Рассмотрим уравнение однопараметрического семейства кривых в полярной системе координат $\Phi(\rho,\theta,a)=0$. Чтобы построить изогональные траектории, нужно составить дифференциальное уравнение семейства, затем заменить в нем $\rho'=\frac{d\rho}{d\theta}$ на производные по формуле (13). В результате получим дифференциальное уравнение для определения изогональной траектории в полярной системе координат. Когда $\alpha=\pi/2$, то производная ρ' заменяется на $-\frac{\rho^2}{\rho'}$ (осуществляется предельный переход в (13) при $k\to\infty$).

Пример 1. Рассмотрим пример построения семейства изогональных траекторий к семейству кардиоид. Пусть задано семейство кардиоид в полярной системе координат:

$$\rho=a(1+\cos\theta),$$

где a – параметр. Дифференцируем уравнение семейства по θ, из полученного уравнения и уравнения семейства исключаем параметр a, находим искомое дифференциальное уравнение семейства

$$\rho'(1+\cos\theta)+\rho\sin\theta=0. \qquad (14)$$

Заменим в (14) производные по формуле (13), индексы опускаем, получим уравнение для изогональных траекторий $\rho'(1+\cos\theta-k\sin\theta)+\rho(k+\sin\theta+k\cos\theta)=0$.

Интеграл данного уравнения удается найти в аналитическом виде:

$$\rho(\theta)=C(k^2\cos\theta-\cos\theta+2k\sin\theta-k^2-1).$$

В случае $k=\operatorname{tg}a$ кривые, пересекающие заданное семейство кардиоид под углом a, задаются уравнением

$$\rho(\theta)=a(1+\cos(\theta-2a)).$$

Семейство кардиоид и изогональные ему траектории, пересекающие кривые данного семейства под углом $\alpha=\frac{\pi}{4}$, изображены на рис. 8.

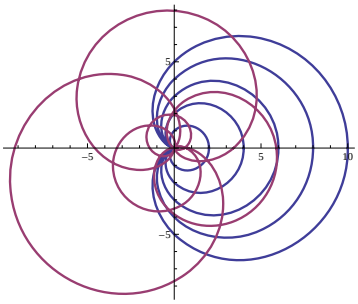


Рис. 8

Пример 2. Рассмотрим семейство логарифмических спиралей $\rho(\theta)=ae^{\theta}$. Дифференциальное уравнение семейства: $\rho'=\rho$. Изогональные траектории найдем, решив уравнение (13) для фиксированных значений k, при $k=1$ решение этого уравнения $\rho=\text{const}$, т. е. заданное семейство спиралей под углом $\frac{\pi}{4}$ пересекает семейство концентрических окружностей с центром в начале координат (рис. 9).

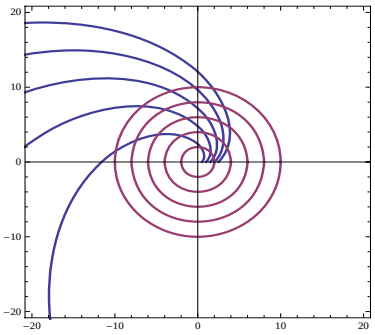


Рис. 9

Пример 3. Введем специальную структуру армирования: прямолинейные радиальные направления. Это пучок прямых с центром в начале координат. Пусть тангенс угла пересечения семейства прямых изогональными траекториями равен $k=\operatorname{tg}\alpha$, причем $\alpha\neq\frac{\pi}{2}$. Уравнение изогональных траекторий к данному семейству в полярной системе координат дает семейство логарифмических спиралей вида $\rho=Ce^{\frac{\theta}{k}}$, где C – произвольная константа.

Множество структур армирования на основе выбранного прямолинейного радиального направления представлено на рис. 10–12 для значений $k=1,2,3$ соответственно.

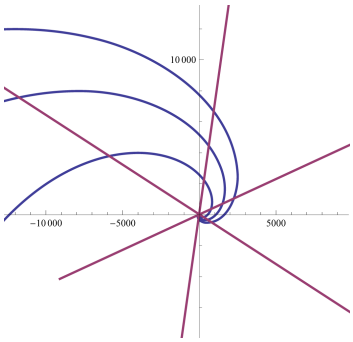


Рис. 10

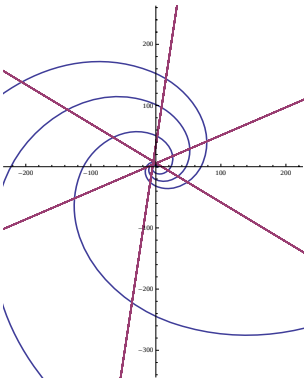


Рис. 11

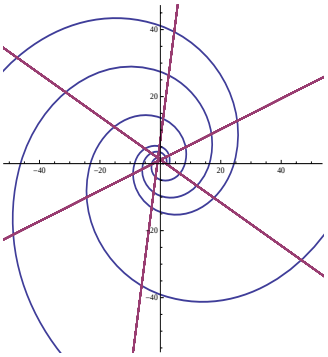


Рис. 12

Заметим, что при технологической реализации процесса изготовления армированной конструкции необходимо произвести вырез в виде некоторой окружности в начале координат, затем волокна располагают вдоль радиальных направлений. В качестве второго семейства армирующих волокон предлагается выбирать построенные изогональные траектории, т. е. найденные разнообразные семейства логарифмических спиралей.

Армирование по изогональным траекториям. Зададим некоторую криволинейную ортогональную систему координат (ξ,η). Направим траектории армирования следующим образом: одна траектория армирования совпадает с линией криволинейной ортогональной системы координат, другая ей изогональна, т. е. пересекает ее под постоянным углом α, $k = \operatorname{tg}\alpha$. Тогда один угол армирования, например, $\varphi_1 = \dfrac{\pi}{2}$, второй угол армирования $\varphi_2 = \operatorname{arctg} k$. Другой вариант армирования – $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \operatorname{arctg} k$.

Запишем условие постоянства сечений волокон m-го семейства в соответствии с [4; 6]:

$$\frac{\partial}{\partial\xi}(H_2\omega_m\cos\varphi_m)+\frac{\partial}{\partial\eta}(H_1\omega_m\sin\varphi_m)=0, \qquad (16)$$

где $H_1(\xi,\eta), H_2(\xi,\eta)$ – дифференциальные коэффициенты Ламе; ω_m – интенсивности армирования, $m = 1,2$. Для указанных структур армирования из уравнения (16) в первом случае ($\varphi_1 = \dfrac{\pi}{2}$, $\varphi_2 = \operatorname{arctg} k$) получим

$$\begin{gathered}\frac{\partial}{\partial\eta}(H_1\omega_1\sin\varphi_1)=0,\\ \frac{\partial}{\partial\xi}(H_2\omega_2\cos\varphi_2)+\frac{\partial}{\partial\eta}(H_1\omega_2\sin\varphi_2)=0.\end{gathered} \qquad (17)$$

Дополнительные условия на интенсивности ω_1, ω_2 зададим на том контуре, где волокна входят в конструкцию. Предположим, что $\omega_1^0(\eta)$, $\omega_2^0(\eta)$, $\omega_1^0(\xi)$ – известные функции, заданные на линиях $\xi = \xi^0 = \text{const}$, $\eta = \eta^0 = \text{const}$. Первое уравнение в (17) можно проинтегрировать:

$$\omega_1(\xi,\eta)=\frac{H_2(\xi,\eta^0)\omega_1^0(\xi)}{H_2(\xi,\eta)}.$$

Поскольку криволинейная ортогональная система координат вводится аналитическими функциями комплексного переменного [6], то в каждой точке (ξ,η) коэффициенты Ламе равны между собой: $H_1(\xi,\eta) = H_2(\xi,\eta)$. При записи второго уравнения в (17) воспользуемся заменой $\omega_3 = H_1\omega_2 = H_2\omega_2$, получим

$$\frac{\partial}{\partial\xi}(\omega_3)+k\frac{\partial}{\partial\eta}(\omega_3)=0. \qquad (18)$$

Уравнение (18) является однородным дифференциальным уравнением с частными производными первого порядка, условия на интенсивности ω_1, ω_2 на контуре, где волокна входят в конструкцию, соответствуют задаче Коши. Ищем семейство решений, содержащих произвольную функцию, предварительно строим обыкновенное дифференциальное уравнение в форме

$$\frac{d\xi}{1}=\frac{d\eta}{k}. \qquad (19)$$

Находим общий интеграл (19), он равен $-k\xi+\eta = \text{const}$. Тогда общее решение (18) запишем как

$$\omega_3 = F_1(-k\xi+\eta),$$

где F_1 – любая непрерывно дифференцируемая функция. Укажем очевидное решение: $\omega_3 = \text{const}$. Далее решаем задачу Коши. Пусть $\omega_3 = H_2(\xi^0,\eta)\omega_2^0(\eta)$ при $\xi = \xi^0$. Разрешая общий интеграл (19) относительно переменной η, записываем искомое решение в виде

$$\omega_2=\frac{H_2(\xi^0,\eta)\omega_2^0(-k\xi+\eta+k\xi^0)}{H_2(\xi,\eta)}.$$

Во втором случае $(\varphi_1 = 0,\ \varphi_2 = \operatorname{arctg} k)$ уравнения (16) примут вид

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(H_2\omega_1 \cos\varphi_1) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(H_2\omega_2 \cos\varphi_2) + \frac{\partial}{\partial \eta}(H_1\omega_2 \sin\varphi_2) = 0.$$

Решения находим аналогично (17):

$$\omega_1(\xi,\eta) = \frac{H_2(\xi^0,\eta)\omega_1^0(\eta)}{H_2(\xi,\eta)},$$

$$\omega_2 = \frac{H_2(\xi^0,\eta)\omega_2^0(-k\xi + \eta + k\xi^0)}{H_2(\xi,\eta)}.$$

Полученные значения для интенсивностей армирования используем далее в работе для вычисления коэффициентов при построении разрешающей системы уравнений. Различные решения для интенсивностей приводят к различным разрешающим уравнениям задачи армированной среды.

В работе [6] установлена разрешающая система трех дифференциальных уравнений в криволинейных ортогональных координатах относительно трех компонент тензора деформаций $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$:

$$C_1\frac{\partial^2\varepsilon_{22}}{\partial\xi^2} + C_2\frac{\partial^2\varepsilon_{11}}{\partial\eta^2} + C_3\frac{\partial^2\varepsilon_{12}}{\partial\xi\partial\eta} + C_4\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\xi} + C_5\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\eta} +$$
$$+ C_6\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\xi} + C_7\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\eta} + C_8\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\xi} + C_9\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\eta} +$$
$$+C_{10}\varepsilon_{11} + C_{11}\varepsilon_{22} + C_{12}\varepsilon_{12} = 0; \qquad (20)$$

$$a_{11}\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\xi} + a_{12}\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\eta} + a_{13}\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\xi} + a_{14}\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\eta} + a_{15}\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\xi} + a_{16}\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\eta} +$$
$$+ F_1(H_1, H_2, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{1,\xi}, \varphi_{1,\eta}, \varphi_{2,\xi}\varphi_{2,\eta}) + H_1H_2\Phi_1 = 0;$$

$$a_{21}\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\xi} + a_{22}\frac{\partial\varepsilon_{11}}{\partial\eta} + a_{23}\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\xi} + a_{24}\frac{\partial\varepsilon_{22}}{\partial\eta} + a_{25}\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\xi} + a_{26}\frac{\partial\varepsilon_{12}}{\partial\eta} +$$
$$+F_2(H_1, H_2, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{1,\xi}, \varphi_{1,\eta}, \varphi_{2,\xi}\varphi_{2,\eta}) + H_1H_2\Phi_2 = 0.$$

Значения коэффициентов C_s, $s = 1, \ldots 12$, через параметры Ламе приведены в [6]. В разрешающей системе (20) первое уравнение является уравнением совместности деформаций в произвольной криволинейной системе координат, два остальных уравнения – это уравнения равновесия плоской задачи в криволинейной системе координат, выраженные через компоненты деформаций $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$. Для коэффициентов a_{ij}, в соответствии с введенным способом армирования, получаем выражения

$$a_{11} = H_2(\Omega m_3 + E_1\omega_1 + E_2\omega_2\frac{1}{(1+k^2)^2}),$$

$$a_{12} = H_1E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k}{(1+k^2)^2},$$

$$a_{13} = H_2\left(\Omega\nu m_3 + E_2\omega_2\frac{k^2}{(1+k^2)^2}\right),$$

$$a_{14} = H_1E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k^3}{(1+k^2)^2},$$

$$a_{15} = 2H_2E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k}{(1+k^2)^2},$$

$$a_{16} = 2H_1\left(E_2\omega_2\frac{k^2}{(1+k^2)^2} + \Omega m_4/2\right),$$

$$a_{21} = H_2E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k}{(1+k^2)^2},$$

$$a_{22} = H_1\left(\nu m_3\Omega + E_2\omega_2\frac{k^2}{(1+k^2)^2}\right),$$

$$a_{23} = H_2E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k^3}{(1+k^2)^2}, \qquad (21)$$

$$a_{24} = H_1(\Omega m_3 + E_2\omega_2\frac{k^4}{(1+k^2)^2}),$$

$$a_{25} = 2H_2\left(\Omega m_4/2 + E_2\omega_2\frac{k^2}{(1+k^2)^2}\right),$$

$$a_{26} = 2H_1E_2\omega_2\delta_\alpha\frac{k^3}{(1+k^2)^2},$$

где $\Omega = 1-(\omega_1+\omega_2)$; E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала связующего; E_m – модуль Юнга материала m-го семейства армирующих волокон, $m_3 = \frac{E}{1-\nu^2}$, $m_4 = \frac{E}{1+\nu}$. Значения символа δ_α, входящего в выражения (21), равны единице или минус единице и учитывают выбор знака в формулах тригонометрии при переходе от синуса и косинуса угла α к его тангенсу в зависимости от величины угла армирования.

Исследуем тип разрешающей системы (20) для рассматриваемого случая армирования аналогично подходу [6]. Для этого найдем корни λ характеристического уравнения

$$\begin{vmatrix} 1 & \lambda^2 & -2\lambda \\ (a_{11}\lambda^2 + a_{12}\lambda) & (a_{13}\lambda^2 + a_{14}\lambda) & (a_{15}\lambda^2 + a_{16}\lambda) \\ (a_{21}\lambda^2 + a_{22}\lambda) & (a_{23}\lambda^2 + a_{24}\lambda) & (a_{25}\lambda^2 + a_{26}\lambda) \end{vmatrix} = 0, \qquad (22)$$

где коэффициенты a_{ij}, $i = 1,2$; $j = \overline{1,6}$ из (21).

Уравнение (22) представляет собой полное алгебраическое уравнение четвертого порядка. Его коэффициенты зависят от технических характеристик материала связующего и арматуры, интенсивностей армирования волокнами первого и второго семейства и параметра k, который задается при построении траекторий, изогональных к данному семейству кривых.

Исследуем корни характеристического уравнения при фиксированном материале, но изменяя интенсивности армирования и параметр k. Рассмотрим следующие варианты комбинации выбора материала для матрицы (связующего) и арматуры (армирующих волокон): связующее – алюминий, армируем стальными волокнами; связующее – медь, армируем волокнами

из вольфрама; связующее – графит, армируем волокнами из стали. Зададим различные варианты значений интенсивности и параметра k. Результаты представим в виде таблицы.

Получили, что все корни могут быть действительными; корни могут быть действительными и комплексно сопряженными; все корни могут быть комплексно сопряженными. Основное влияние на характер корней оказывает значение параметра k – тангенса угла армирования по изогональной траектории.

Как видим из таблицы, разные значения углов армирования приводят к разным типам системы разрешающих дифференциальных уравнений (гиперболическому, эллиптическому, смешанному типам), а следовательно, и к разным постановкам краевых задач. Им соответствуют существенно разные решения, что позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием конструкции.

Многообразие структур армирования на базе ортогональной системы координат достигается путем построения изогональных траекторий к данным координатным линиям, оно зависит от выбора параметра k и значений интенсивностей армирования. С изменением структур армирования существенным образом изменяются поля напряжений и деформаций.

Таким образом, разработан метод получения многообразия новых структур армирования путем построения изогональных траекторий к некоторым заданным координатным линиям. Решения новых краевых задач неоднородной анизотропной теории упругости показывают широкие возможности управления полями напряжений и деформаций в плоских тонкостенных конструкциях за счет целевого выбора криволинейных структур армирования.

Библиографические ссылки

1. Nemirovsky Yu. V. On the elastic-plastic behavior of the reinforced layer // Int. J. Mech. Sci. 1970. Vol. 12. P. 898–903.

2. Федорова Н. А. Решение плоской задачи упругой среды, армированной тремя семействами волокон // Вычисл. технологии. 2005. Т. 5. С. 90–100.

3. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Моделирование деформирования плоских авиационных конструкций, армированных двумя семействами криволинейных волокон // Вестник СибГАУ. Вып. 6 (13). 2006. С. 38–44.

4. Бушманов С. П., Немировский Ю. В. Проектирование пластин, армированных равнонапряженными волокнами постоянного поперечного сечения // Механика композитных материалов. 1983. № 2. С. 278–284.

5. Немировский Ю. В., Кургузов В. Д. Прочность и жесткость стеновых железобетонных панелей со сложными структурами армирования // Изв. вузов. Строительство. 2003. № 2. С. 4–11.

6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Армирование плоских конструкций по криволинейным ортогональным траекториям // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. наук. 2010. С. 96–104.

7. Уфлянд Я. С. Биполярные координаты в теории упругости. М. : Гостехиздат, 1950.

8. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. М. : Гостехиздат, 1953.

Корни характеристического уравнения при фиксированном материале в зависимости от интенсивности армирования и параметра k

Материал	Интенсивности армирования	$k=1$	$k=\sqrt{3}$	$k=1/\sqrt{3}$
Алюминий + сталь	$\omega_1=0,2;$ $\omega_2=0,2$	$0,5;1,3;$ $-0,36\pm0,27i$	$0,005;7,98;$ $-0,36;-4,75$	$0,28\pm1,02i;$ $-0,36;-4,75$
Алюминий + сталь	$\omega_1=0,3;$ $\omega_2=0,3$	Все корни действительные	Все корни действительные	$0,33\pm0,85i;$ $-0,35\pm0,48i$
Медь + вольфрам	$\omega_1=0,2;$ $\omega_2=0,2$	$0,48;\ 1,35;$ $-0,8\pm0,257i$	Все корни действительные	$0,28\pm i;$ $-0,307\pm0,58i$
Графит + сталь	$\omega_1=0,2;$ $\omega_2=0,2$	Все корни действительные	Все корни действительные	$0,318\pm0,42i;$ $-0,46\pm0,344i$

N. A. Fedorova

SIMULATING THE PLANE AIRCRAFT CONSTRUCTIONS DEFORMATION WITH COMPLEX CURVILINEAR REINFORCEMENT STRUCNURES

For determining of limitary deformations for planar constructions reinforced with curvelinear trajectories the resolving equations are obtained for orthotropic non-homogeneous linear elasticity problem. A variety of orthogonal systems – oriented reinforcement structures is obtained by isogonal trajectories designing for current coordinate lines.

Keywords: reinforcement, structure model, isogonal trajectories.

© Федорова Н. А., 2011

УДК 681.518

Э. М. Чуркин

ИННФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ЕДИНОЕ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО»

Рассматривается информационная система «Единое терминологическое пространство», хранящая структурированную информацию и технологии учебного процесса кафедры, факультета и НИОКР технопарка. Система автоматизирует работу преподавателя, инженерно-технического персонала, студентов. Технопарк участвует в создании инновационной среды и новых технологий.

Приводится пример создания системы диагностики авиационного оборудования.

Ключевые слова: информационная система, единое терминологическое пространство, технологии интерактивного управления, инновации, моделирование.

Научно-техническая революция мотивирует создание новых совершенных средств и способов моделирования и управления с целью совершенствования учебного процесса вуза и подготовки эффективных технологий и инноваций для промышленности.

Для указанных целей создана и используется информационная система «Единое терминологическое пространство» (ЕТП) (рис. 1).

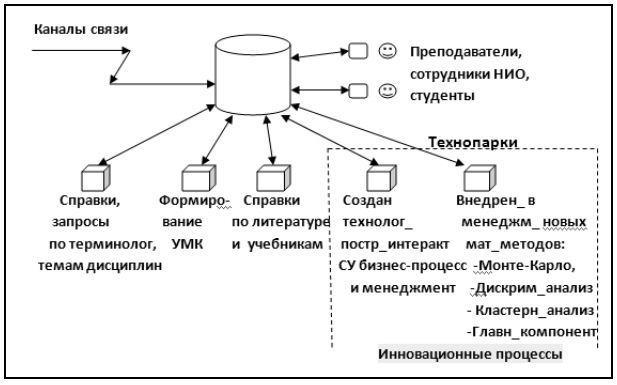


Рис. 1. Информационная система аэрокосмических университетов

Система ЕТП осуществляет сбор и хранение структурированной терминологической информации дисциплин кафедры, электронных учебников, УМК, что обеспечивает единство понятий в рамках учебных направлений и соблюдение стандартов; выдает терминологические справки, позволяет создавать статьи по опорным понятиям лекций.

Технопарк содержит инструментарии создания технологий интерактивных систем управления (СУ) и внедрения новых математических методов в бизнес и менеджмент, позволяющих осуществлять целенаправленную инновационную деятельность.

Управление системой ЕТП осуществляется через главное меню (рис. 2).

Непосредственная работа с информацией: поиск, чтение, занесение, редактирование осуществляется через экранную форму (рис. 3).

Поиск и выбор записи с требуемой информацией производится из ниспадающего списка справа (см. рис. 3).

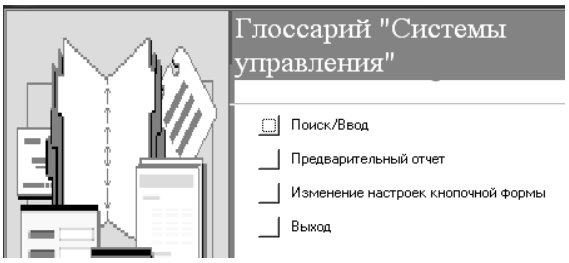


Рис. 2. Главное меню

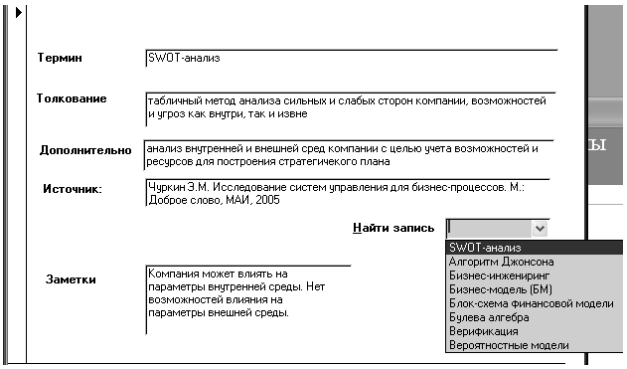


Рис. 3. Экранная форма для работы с информацией

Из главного меню имеется возможность печатать предварительный отчет (рис. 4).

Термин	Толкование	Дополнительно	Источник	Заметки
SWOT-анализ	табличный метод анализа сильных и слабых сторон компании, возможностей и угроз как внутри, так и извне	анализ внутренней и внешней сред компании с целью учета возможностей и ресурсов для построения стратегичекого плана	Чуркин Э.М. Исследование систем управления для бизнес-процессов. М.: Доброе слово, МАИ, 2005	Компания может влиять на параметры внутренней среды. Нет возможностей влияния на параметры внешней среды.
Алгоритм Джонсона	упорядочивание работ на 2-х или 3-х станках	Минимизирует время выполнения последовательности работ	Кофман А. Введение в исследование операций. М.: Мир, 1970	Преимущества упорядочивания иллюстрируются диаграммами Ганта

Рис. 4. Пример отчета

Отчет может иметь вид статьи.

Инструментарий создания технологии интерактивной СУ для определенного бизнес-процесса фор-

мирует в Excel систему управления из связанных компонентов. В качестве входной информации используется структурная схема бизнес-процесса (см. пример на рис. 5).

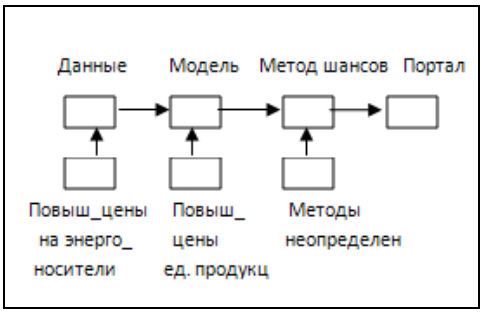


Рис. 5. Оценка доходности производственного проекта в условиях неопределенности

Для данной схемы строится система интерактивного управления из связанных компонентов (рис. 6).

Компонент *Данные* содержит в определенном формате исходные данные. Компонент *Модель* выполняет основные вычисления. Компонент *Метод шансов* уменьшает неопределенность.

Компоненты *Повыш_ цены на энерго_носит_* и *Повыш_цены ед._продукц* моделируют динамику взаимодействия субъектов: поставщика энергоносителей и производителя продукции. Отдельно выделен компонент *Методы неопределенности*, аккумулирующий достижения в области науки и позволяющий подбирать для заданного бизнес-процесса более эффективный метод снижения неопределенности.

Все результаты моделирования для мониторинга и оценки ожидаемых последствий подготавливаемых решений передаются в *Портал* (рис. 7), где производится окончательная подготовка управленческих решений и осуществляется управление процессом.

Управление проектом в условиях неопределенности предполагает анализ кризисных ситуаций. В качестве примера рассмотрим 10-кратное повышение цены на электроэнергию. Управление этим процессом показано в *Портале* на протяжении трех фаз кризиса. Для каждой отдельной фазы выделен один столбец. На экране изображены 3 фазы состояния кризиса с предложениями по уменьшению его влияния на производство. Фазы иллюстрируют динамику влияния кризиса на производство и эффективность средств защиты. Ценно, что при управлении процессом можно видеть степень влияния средств защиты и получаемые результаты.

Рис. 6. Компоненты системы интерактивного управления

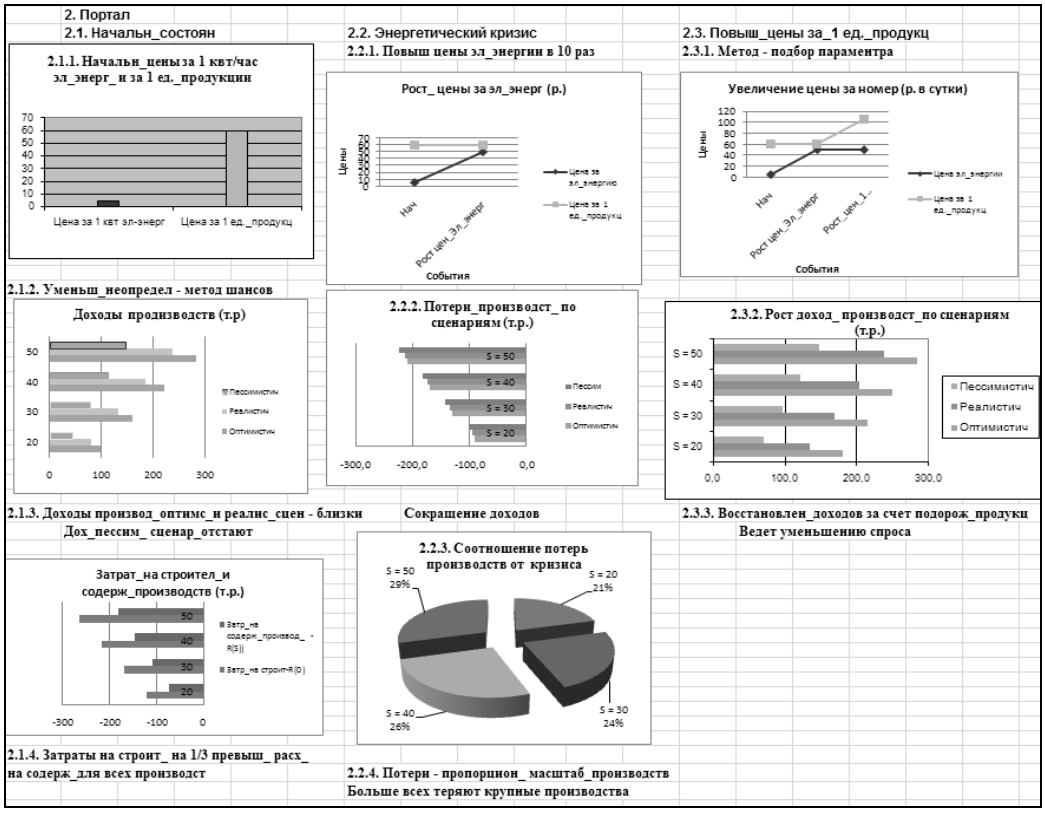


Рис. 7. Фрагмент *Портала*

Инструментарий внедрения новых математических методов в производство предполагает постановку производственной задачи, подбор и разработку методов и алгоритмов решения, построение системы управления и ее применение.

Работу инструментария рассмотрим на примере построения системы диагностики неисправностей авиационного оборудования (АО) на основе метода дискриминантного анализа (МДА), классифицирующего многомерные наблюдения по нескольким категориям.

С помощью МДА анализируются статистические данные о неисправностях АО и строятся пространство дискриминантных функций, канонические функции и центроиды классов, которые переносятся в Excel, где диагностируются поступающие сообщения о неисправностях АО.

МДА реализован в программном пакете STATGRAPHICS Plus for Windows, что существенно ускоряет работу и повышает достоверность испытаний.

Статистическая диагностическая система включает базу данных испытаний; MS Office Excel; пакет STATGRAPHICS for Windows (рис. 8).

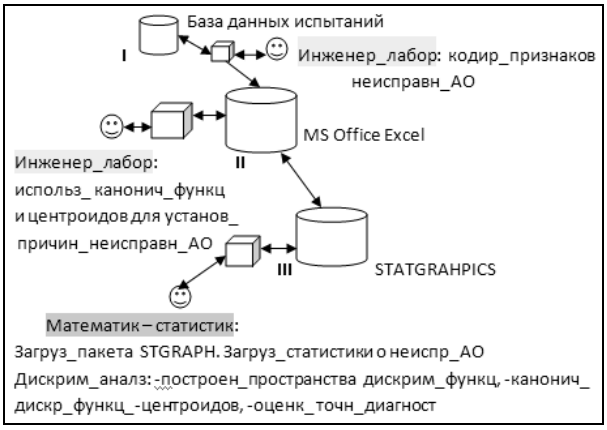


Рис. 8. Статистическая диагностическая система

Авиационное оборудование проверяется на испытательном стенде. Результаты испытаний записываются в базу данных и поступают на дисплей инженера лаборатории. Сообщения о неисправностях в виде отклонений значений признаков кодируются по инструкции и передаются для диагностики в MS Excel.

Диагностика выполняется в 2 этапа: подготовительный и основной.

На подготовительном этапе диагностики математик-статистик выполняет настройку статистической системы. Загружает статистику предшествующих неисправностей АО, производит анализ статистики и по результатам строит пространство дискриминантных функций, канонические дискриминантные функции, центроиды классов, определяет точность диагностики.

На основном этапе диагностики инженер лаборатории принимает из базы данных сообщения о неисправности испытываемого АО. Кодирует признаки неисправностей по шаблону. Открывает электронную таблицу Excel, в которой для диагностируемого сообщения вычисляет значения дискриминантных функций как сумму парных произведений коэффициентов дискриминантных функций на соответствующие коды признаков. Значения функций являются координатами диагностируемого сообщения в пространстве дискриминантных функций (рис. 9).

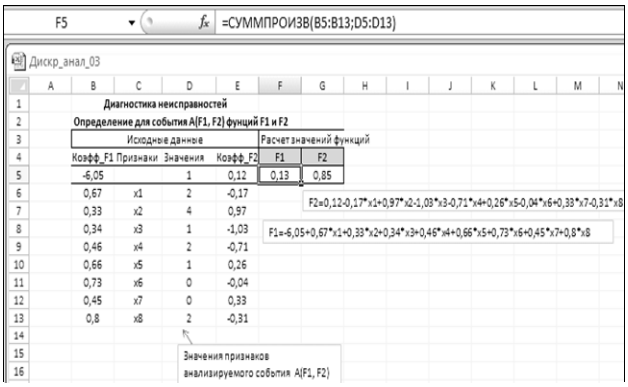


Рис. 9. Пример диагностики пришедшего сообщения на листе Excel

В Excel строится пространство дискриминантных функций и центроидов. В это пространство включаются координаты точки диагностируемого сообщения. Минимальное расстояние от этой точки до центроидов диагностирует неисправность с указанием точности диагностики (рис. 10).

В рассматриваемом примере диагностируемые неисправности АО разделены на 4 группы:

– 1-я – неисправности двигательной установки (наблюдалось 28 случаев);

– 2-я – неисправности электрооборудования (25 случаев);

– 3-я – неисправности системы управления (26 случаев);

– 4-я – другие неисправности (24 случая).

Признаки неисправностей обозначаются переменными: x1, x2, x3,…, x8. Значения признаков представлены кодами.

Задача диагностики формулируется следующим образом.

Имея статистические данные по неисправностям АО, с помощью пакета STATGRAPHICS провести дискриминантный анализ:

– определить дискриминантные функции, представляющие значимую диагностическую информацию;

– найти константы и коэффициенты для первых двух дискриминантных функций F1 и F2;

– рассчитать координаты центроидов групп и точность диагностики;

– определить групповые характеристики;

– построить диаграмму рассеивания;

– сформулировать диагностическое правило нахождения расстояний от диагностируемого объекта до

центроидов классов в пространстве канонических дискриминантных функций;

– произвести с помощью правила диагностику произошедшего события.

Для сообщения определяются дискриминантные функции, являющиеся его координатами в дискриминантом пространстве канонических функций.

Групповые центроиды С1, С2, С3 и диагностируемое событие, которому соответствует точка A(F1, F2), показаны на рис. 10.

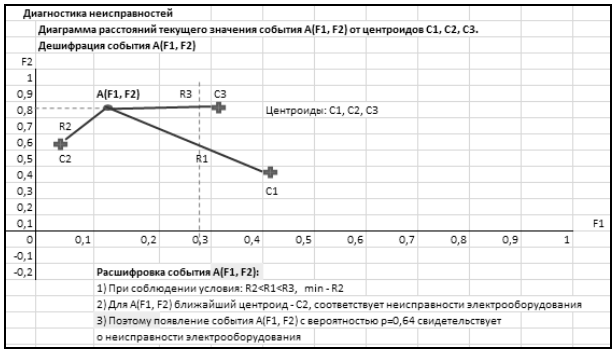


Рис. 10. Построение пространства дискриминантных функций и центроидов

Для A(F1, F2) ближайший центроид – С2, соответствует группе неисправностей электрооборудования.

Следовательно, при испытании авиаоборудования появление события A(F1, F2) с точностью диагностики STATGRAPHICS в 64 % свидетельствует о неисправности электрооборудования.

Дальнейшее повышение точности диагностики дает применение линейных дискриминантных функций Фишера, называемых в STATGRAPHICS Classification Functions.

Использование информационной системы ЕТП обеспечивает учебный процесс единым понятийным аппаратом, повышает качество учебной работы, исключает неоднозначность и противоречивость. Преподаватели используют ЕТП при подготовке лекций, студенты – при подготовке к контрольным занятиям, экзаменам, выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

Для работы технопарка в ЕТП имеются инструментарии создания новых технологий интерактивного управления бизнес-процессами и менеджментом. Внедрение в менеджмент новых математических методов показано на примере создания системы диагностики неисправностей авиационного оборудования.

Рассмотренные технологии готовы к использованию в инновационных процессах для установления и оценки новых связей и свойств параметров изделий на уровне функций.

Системы и блоки ЕТП построены на единой информационной платформе Microsoft и STATGRAPHICS. Имеют удобные интерфейсы, печатают стандартные отчеты, справки и строят графики.

Совместное использование информационной системы ЕТП и инструментариев технопарка открывает возможности прогнозирования инновационных прорывов в области технологий как творческой комбинации идей, знаний специалистов, объектов и компонентов уже существующих технологий, приводит к созданию условий для возникновения синергетического эффекта.

Разработанные системы представляют новый уровень развития и совершенствования высоких технологий при подготовке и принятии решений с помощью моделирования.

Обслуживание указанных систем производится специалистами высокой квалификации: инженерами по знаниям, инженерами по производству, владеющими дискретной математикой, статистикой, современными компьютерными технологиями и методами искусственного интеллекта.

С усложнением процессов менеджмента и бизнеса с каждым годом возрастает значение систем моделирования, имитации и анализа. Адекватно им должны вкладываться усилия специалистов и средства, чтобы не допустить отставания в данной области знаний, так как догонять труднее и дороже, а зачастую и бесполезно.

E. M. Churkin

THE INFORMATION SYSTEM “UNIFORM TERMINOLOGICAL SPACE”

The Information System “Uniform Terminological Space”, working on the basis of the Glossary, which services terminological requests on control of educational process and institute subdividing, is considered.

Keywords: information system, uniform terminological space, technology interactive control, innovation, modeling.

© Чуркин Э. М., 2011

Раздел
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 629.7.036.74

В. В. Гопанчук, В. С. Жасан, М. Ю. Потапенко

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследований влияния способов подачи газа в полость разрядной камеры на основные параметры и характеристики электрореактивных двигателей (ЭРД). Повышение эффективности работы ЭРД достигается за счет, во-первых, дополнительного распределения газа по глубине разрядной камеры путем приближения каналов впрыска газа непосредственно к входу в зону ионизации, и, во-вторых, ориентации каналов впрыска газа таким образом, чтобы подаваемый газ преимущественно подавался вдоль входа в зону ионизации. Испытания проводились на моделях различного типоразмера в диапазоне рабочих мощностей от 100 Вт до 2,3 кВт, включая режимы работы при высоких разрядных напряжениях.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, стационарный плазменный двигатель, гибридный плазменный двигатель, разрядная камера, анод-газораспределитель, коэффициент ионизации.

Плазменные двигатели на основе ускорителя плазмы с замкнутым дрейфом электронов, такие как стационарный плазменный двигатель (СПД), двигатель с анодным слоем (ДАС), а также появившийся в последние годы гибридный плазменный двигатель (ГПД) [1], имеют достаточно высокие интегральные характеристики. В СПД стабильность основных параметров и характеристик, особенно обеспечение ресурса работы, существенно зависит от организации процесса подачи рабочего тела (РТ) в разрядную камеру (РК). Организация процесса подачи РТ осуществляется, как правило, через каналы подвода РТ, выполненные в необходимом количестве в виде калиброванных отверстий, обеспечивающих азимутальную равномерность распределения РТ в коаксиальном ускорительном канале (УК) как необходимого условия обеспечения однородности разряда плазмы [2, с. 143–145].

Жесткие требования к обеспечению высокой азимутальной равномерности распределения разряда плазмы в УК, существенно влияющей на КПД и ресурс работы таких ЭРД, требуют разработки дополнительных мероприятий, направленных на дальнейшее повышение однородности распределения РТ как в азимутальном направлении, так и в продольном направлении УК, путем размещения каналов впрыска РТ по всему окружающему объему вблизи входа зоны ионизации [2, с. 151].

Учитывая вышесказанное, целью данной работы являлось исследование влияния организации процесса подачи РТ в РК ЭРД, а также проведение анализа конструкций анодов-газораспределителей различных моделей СПД и ГПД с целью определения дополнительных путей повышения азимутальной равномерности распределения рабочего газа в УК для стабилизации основных удельных параметров и характеристик ЭРД.

Повышение эффективности управления концентрацией плазмы в пристеночных участках может быть достигнуто за счет новой геометрии комбинированной металлокерамической РК, в которой появляется возможность осуществления дополнительного впрыска части рабочего газа непосредственно в пристеночных областях, когда глубина зоны ионизации по мере приближения к её стенкам становится меньше ширины УК.

При такой организации подачи РТ в РК решалась также задача по обеспечению однородности распределения газа в коаксиальном УК в азимутальном направлении при условии подвода РТ к ЭРД по одной газовой магистрали подвода РТ.

Кроме того, оптимизация процессов ионизации внутри УК является важным и для снижения энергетических затрат, обусловленных вторичной ионизацией ионов.

Как известно, концентрация нейтральных атомов в РК зависит в основном от подаваемого расхода РТ, а также от геометрических размеров и объема РК [3, с. 187].

Исследование проводилось по изучению влияния дополнительного объемного распределения РТ по глубине УК в комбинации с обеспечением азимутальной равномерности распределения РТ.

Основным критерием для оценки использования РТ являлся коэффициент переработки нейтральных атомов подаваемого РТ в ускоряемые ионы (часто называемый также коэффициентом использования РТ) [4]:

$$K_i = I_i / I_{\dot{m}}, \qquad (1)$$

где I_i – ток ионов, выходящих из канала; $I_{\dot{m}}$ – расход, выраженный в токовых единицах:

$$I_{\dot{m}} = \frac{\dot{m}}{M} e, \qquad (2)$$

где $\dot{m}$ – расход РТ; M – масса атомов РТ (для ксенона $M = 2{,}18 \cdot 10^{-25}$ кг); e – заряд электрона.

Как известно, наиболее оптимальным считается режим функционирования ЭРД, когда все нейтральные атомы РТ тела однократно ионизуются, и впоследствии все образовавшиеся ионы ускоряются. При этом желательно, чтобы число попадающих на стенки ионов. приводящих к их нейтрализации с последующей повторной ионизацией образовавшихся атомов было минимально или, чтобы они отсутствовали полностью ($K_i \approx 1$).

Рассмотрим более подробно конструкцию специального газораспределителя, изготовленного для та-

кого рода исследований, функции которого из конструктивных соображений лучшей компактности рациональней совмещать с анодом.

Для исследования влияния равномерности распределения РТ по азимуту и глубине УК, а также определения наиболее оптимальных мест расположения впрыска газа непосредственно в РК при одних и тех же условиях испытаний на эффективность процессов ионизации и ускорения был разработан и изготовлен специальный многополостной полый анод с несколькими независимыми газораспределительными полостями и трактами подачи РТ в различные области УК (рис. 1). Такой анод был применен в составе двигателя SPT-1 и прошел исследовательские испытания при различных комбинациях подачи рабочего газа в диапазоне расходов от 2,2 до 5,8 мг/с.

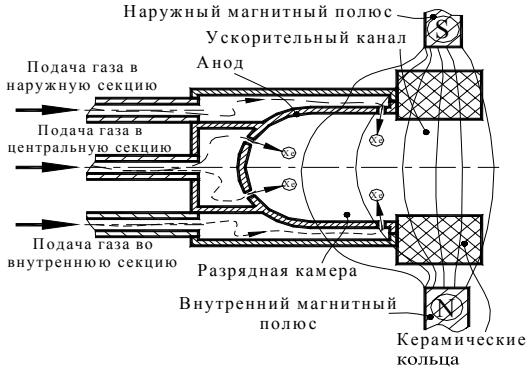
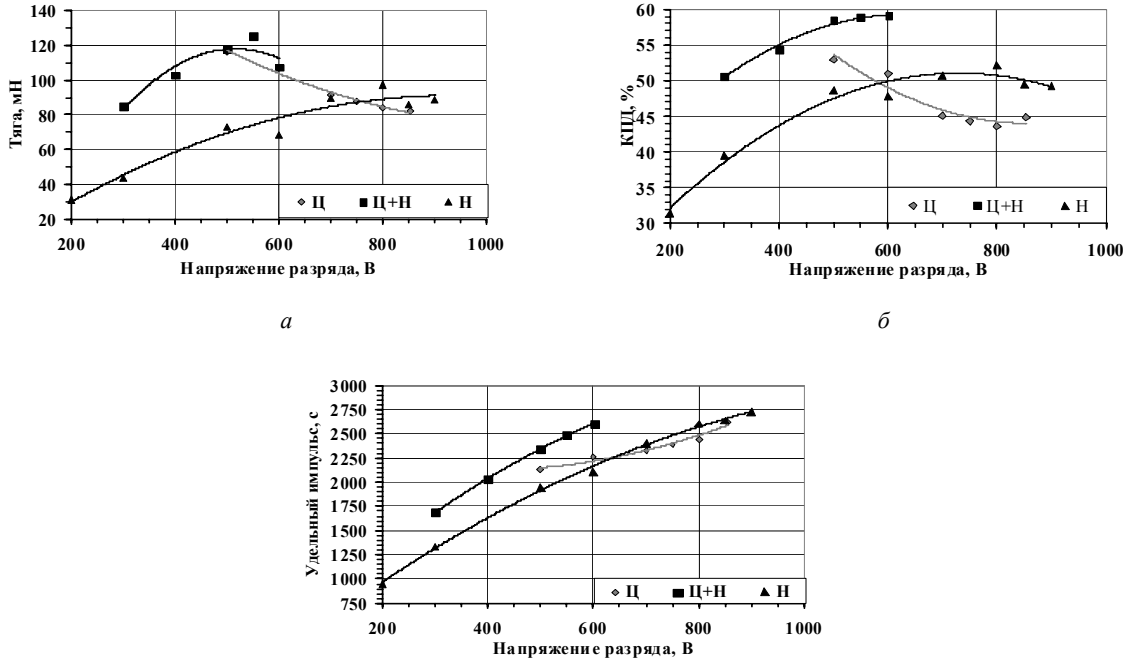


Рис. 1. Многополостной анод-газораспределитель

Испытанный многополостной анод-газораспределитель снабжен дополнительными каналами подачи РТ, которые расположены на выходе из анодной полости – вблизи наружной и внутренней стенок РК. Представлялось, что, задавая и управляя в газораспределителе соотношением расходов между подачей рабочего газа в глубине анодной полости и в различных пристеночный областях, можно улучшить фокусировку ионного потока [5]. Для обеспечения возможности управления независимой подачей РТ в центральную и периферийную части анодной полости, имеющие собственные каналы впрыска рабочего газа в РК, были снабжены независимыми друг от друга трактами подвода рабочего газа.

Результаты проведенных исследовательских испытаний в ОКБ «Факел» при различных способах подачи РТ в полость РК в составе двигателя SPT-1 и полученные при этом зависимости основных параметров и характеристик, таких как тяга, удельный импульс и КПД, представлены на рис. 2.

Во время испытаний при подаче анодного расхода через центральный тракт подачи РТ газ подавался через два концентрических ряда расходных отверстий ∅0,5 мм (по 24 отверстия в каждом ряду), и впрыск РТ осуществлялся только из центральной секции газового распределителя, что воспроизводило типовую для известных СПД и ДАС прямоточную подачу РТ из глубины РК, которая реализуется в результате того, что в большинстве случаев анод-газораспределитель размещается в донной части РК, т. е. на максимальном удалении от среза РК. В данной модели удаленность мест впрыска РТ от входа в зону ионизации (внутренняя граница магнитной линзы ~0,8$B_r$max [6]) составляла 20…21 мм. Такая прямоточная схема подачи РТ обозначена буквой «Ц».



а *б* *в*

Рис. 2. Зависимость от напряжения разряда при различных схемах подачи РТ при постоянной мощности 2,3 кВт: *а* – тяги; *б* – КПД; *в* – удельного импульса двигателя SPT-1

При осуществлении подачи анодного расхода только по наружному тракту подачи РТ газ проходил через 16 расходных отверстий ∅0,7 мм, а впрыск газа в РК осуществлялся в радиальном направлении только из наружной секции газового распределителя. При этом оценивалась эффективность такой радиальной подачи и использования РТ при предельно максимальном приближении мест впрыска РТ к входной части УК (4,0…4,5 мм), что существенно ближе относительно среза РК в сравнении с типовой подачей, применяемой в СПД. Данная радиальная схема подачи РТ обозначена буквой «Н».

В том же случае, когда подача анодного расхода выполнялась только по внутреннему тракту подачи РТ газ проходил также через 16 расходных отверстий ∅0,7 мм, и впрыск газа происходил также в радиальном направлении, но только из внутренней секции газового распределителя. При этом также осуществлялась оценка эффективности такой радиальной подачи и использования РТ при максимальном приближении мест впрыска РТ к входной части УК (4,0…4,5 мм), что также существенно ближе к срезу РК в сравнении с типовой подачей РТ, используемой в СПД и ДАС. Такая радиальная схема подачи РТ была обозначена «В». Каналы впрыска из внутренней части анода были расположены на том же уровне, что и каналы радиального впрыска из наружной секции, но с чередованием между ними за счет сдвига по азимуту.

В случаях комбинированной схемы подачи РТ через различные секции газового распределителя соотношение анодных расходов, идущих через различные полости, обеспечивалось соотношением гидравлических сопротивлений соответствующих трактов. Обозначение комбинированной схемы подачи РТ на рисунках имеет соответствующую комбинацию букв, например, при одновременной радиальной подаче РТ в наружную и центральную секции оно имеет вид «Н+Ц», при этом соотношение анодных расходов составляло ~40–60 %.

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что наилучшая эффективность работы двигателя достигается при комбинированной одновременной прямоточной подаче РТ через центральную и внешнюю радиальную области подачи РТ. В этом случае обеспечивается равномерность распределения подачи газа не только в азимутальном направлении, но и за счет дополнительного распределения газа по глубине УК, т. е. при дополнительном распределении газа по всему рабочему объему прианодной полости. Такое повышение эффективности работы при дополнительном распределении РТ по глубине РК, вероятно, обусловлено избыточной протяженностью УК, что типично для ускорителей плазмы на базе протяженного УК.

Зафиксировано также, что при прямоточной подаче РТ только через центральную секцию газораспределителя, когда нейтральный газ появляется в УК на максимальном удалении от среза РК, зависимости тяги и КПД двигателя от разрядного напряжения имеют спадающий характер при повышении напряжений, что принципиально отличается от поведения зависимостей, полученных при других вариантах подачи газа, и является типичным для СПД.

Кроме того, при любых комбинациях подачи газа с использованием внутренней секции газораспределителя («В»), были зафиксированы относительно низкие результаты по основным параметрам и характеристикам двигателя, даже в сравнении с подобной радиальной подачей РТ, но только через наружную секцию. Проведенный детальный анализ конструкции разрядной и магнитной систем данной модели и их взаимное расположение выявил лишь существование различий локальных структур магнитных полей в зонах расположения наружных и внутренних каналов впрыска РТ в РК (рис. 3).

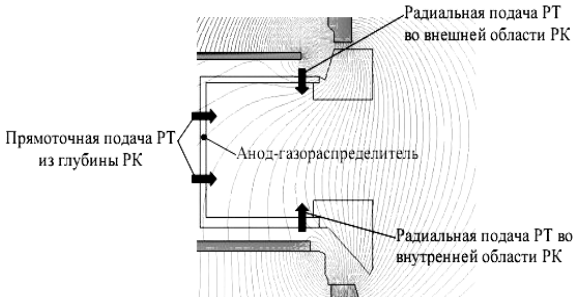


Рис. 3. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке двигателя SPT-1

Если в зоне наружных каналов радиальной подачи РТ силовые линии магнитного поля расположены поперек относительно направления впрыска и данная область является областью относительно больших магнитных полей (т. е. подобие магнитной линзы), то в зоне внутренних каналов впрыска РТ присутствуют преимущественно продольные силовые линии магнитного поля, а сама область является областью действия относительно слабых магнитных полей. Кроме того, выявлена незначительная разница в удаленности наружных и внутренних каналов радиального впрыска РТ относительно области максимальных значений радиальной составляющей индукции магнитного поля, вследствие значительной кривизны ориентации магнитной линзы относительно среза УК (направления потока газа).

Оценка эффективности организации процессов ионизации и ускорения, а также использования РТ, при различных вариантах комбинаций подачи РТ в РК проводилась по коэффициенту ионизации K_i, зависимость которого от разрядного напряжения представлена на рис. 4.

Как видно из полученных результатов, наилучшие показатели коэффициента использования РТ достигаются при комбинированной подаче РТ, сочетающей одновременно радиальный и прямоточный впрыск через наружную и центральную секции газораспределителя, который может быть квалифицирован как наилучший вариант распределения РТ. Как видно, значения этого коэффициента лежат в узко ограниченном диапазоне значений от 0,95 до 1,15, и его рост

стабилизируется на уровне значений K_i ~ 1,18 при последующем повышении разрядных напряжений.

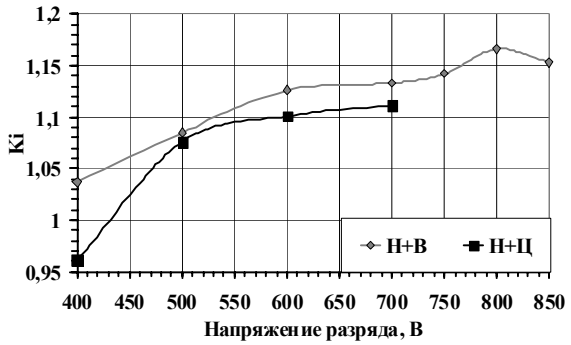


Рис. 4. Зависимость коэффициента ионизации K_i от напряжения разряда при различных схемах подачи РТ в двигателе SPT-1

С целью подтверждения зафиксированного положительного эффекта, выявленного при проведении исследовательских испытаний модели с размером по серединному диаметру канала ∅85 мм, выражающемуся в повышении эффективности работы ЭРД, и изучения возможности минимизации линейных размеров РК путем обеспечения дополнительного объемного распределения РТ в РК, была разработана и изготовлена малоразмерная модель с размером по серединному диаметру канала ∅40 мм под условным наименованием прототип двигателя ПлаС-40. В такой модели полый анод также был выполнен магнитопроводящим, а в его газовом распределителе специально были выполнены различно направленные и расположенные только с наружной стороны РК каналы впрыска РТ, с чередованием расходных отверстий (всего 24 отверстия), обеспечивающих суммарную подачу РТ в радиальном (12 отверстий) и «обратном» к направлению ускорения (12 отверстий) направлениях в пропорции ~50–50 %. Расходные отверстия в данной модели были выполнены диаметром ∅0,35 мм и максимально приближены к входу в УК [7] на расстоянии 6,5…7,0 мм. При этом осуществлялась 100%-ная подача суммарного анодного расхода. Конструктивная схема такого магнитного полого анода, обеспечивающего распределенную подачу РТ как по азимуту, так и по глубине УК, представлена на рис. 5.

Магнитный полый анод-газораспределитель, в конструкции которого была организована подача РТ только с наружной стороны РК, проходил испытания в составе прототипа двигателя ПлаС-40 в диапазоне расходов от 1,25 до 2,50 мг/с (рис. 5).

На первом этапе были проведены параметрические испытания по программе, предусматривающей выполнение и проверку следующих характеристик:

– снятие вольтамперных характеристик (ВАХ) при фиксированных анодных расходах, обеспечивающих токи разряда в диапазоне значений от 1,00 до 2,25 А с шаговым переходом через 0,25 А при токах в катушках намагничивания, оптимизированных при напряжении разряда 150 В;

– определение верхней границы работоспособности модели по мощности;

– проверку эффективности работы катодов-компенсаторов в области малых катодных расходов;

– проверку стабильности характеристик на мощности разряда 200 и 300 Вт.

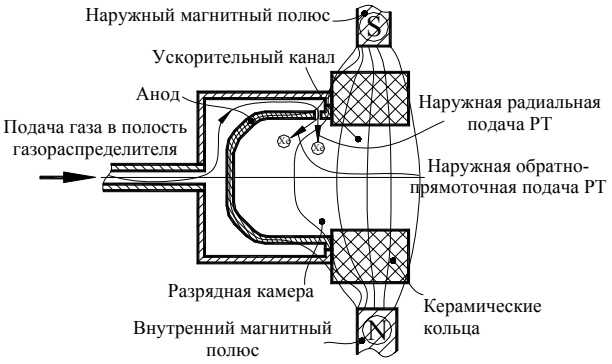


Рис. 5. Магнитный анод-газораспределитель прототипа двигателя ПлаС-40

Отдельно были проведены исследования влияния длины керамических колец (вдоль оси двигателя), формирующих УК, при переходе на высоковольтную работу на режимах повышенной мощности. В результате проведенных испытаний было зафиксировано, что для варианта модели при неизменной ширине ее УК 9 мм, но при укорочении длины керамических колец с 7 до 6 мм, а также одновременном выносе максимума индукции магнитного поля посередине УК за срез канала на ~1 мм, оптимальные режимы (по критерию минимальности разрядного тока) реализуются при более сильных магнитных полях. Это повышает вероятность перехода режимов работы двигателя с оптимальных на менее стабильные, причем с неопределенной произвольной периодичностью и, соответственно, к снижению уровня интегральных параметров и характеристик в среднем на 2–3 %. Однако при этом прототип двигателя ПлаС-40 работал более устойчиво по сравнению с модулем СПД-50 стандартной схемы сопоставимого размера, так как исчезли появлявшиеся в этой модели перегревы выходных участков стенок РК (изготовленные из диэлектрического материала) на высоковольтном режиме $U_\text{р}$ = 500 В. Измеренные на керамических кольцах пояски эрозии имели четкие границы и составляли: ширина наружного пояска 3,0 мм, а внутреннего от 4,0 до 4,5 мм.

Проверка стабильности параметров выполнялась на мощности 200, 300 и 400 Вт. Также была проведена наработка длительностью 1 ч, при этом ширина поясков проявившегося износа керамических колец составила: для наружного 3,0 мм, а внутреннего 3,2 мм, относительно среза разрядной камеры.

Общие результаты проведенных параметрических испытаний следующие (рис. 6):

– была подтверждена работоспособность конструкции при мощностях разряда в диапазоне от 100

до 580 Вт, причем в указанном диапазоне интегральные характеристики сопоставимы, а на отдельных режимах даже превосходят параметры и характеристики модуля СПД-50, работающего в диапазоне расходов от 1,31 до 2,36 мг/с;

– разработанная гибридная конструктивная схема ЭРД с магнитным полым анодом менее чувствительна к изменениям магнитного поля, т. е. более устойчива при изменении токов намагничивания в широких пределах: его параметры остаются практически постоянными. Выявленная стабильность параметров и характеристик, являющаяся нетипичной для СПД, снижает риски срыва на режимы с интенсивным развитием колебаний и существенным снижением эффективности рабочего процесса;

– зафиксированные высокие интегральные характеристики могут достигаться при различных комбинациях токов намагничивания, что позволяет выбирать наиболее оптимальные сочетания ампер-витков, исходя из разнообразных критериев, например, при решении задач по минимизации массы магнитной системы или возможностей включения в разрядную цепь катушек намагничивания.

Анализ полученных данных показывает, что зависимость интегральных параметров и характеристик от напряжения разряда при постоянной мощности имеет характер, аналогичный характеру зависимостей, полученных при работе на переменной мощности. Кроме того, подтверждена эффективность работы анода малых размеров, в котором радиальные каналы впрыска РТ максимально приближены (вынесены по потоку ускорения плазмы) к входу в зону ионизации без потерь в использовании РТ. Результаты анализа по коэффициенту ионизации РТ, полученные при различных режимах по току разряда, а, следовательно, и при различных анодных расходах, представлены в виде зависимостей от разрядного напряжения на рис. 7.

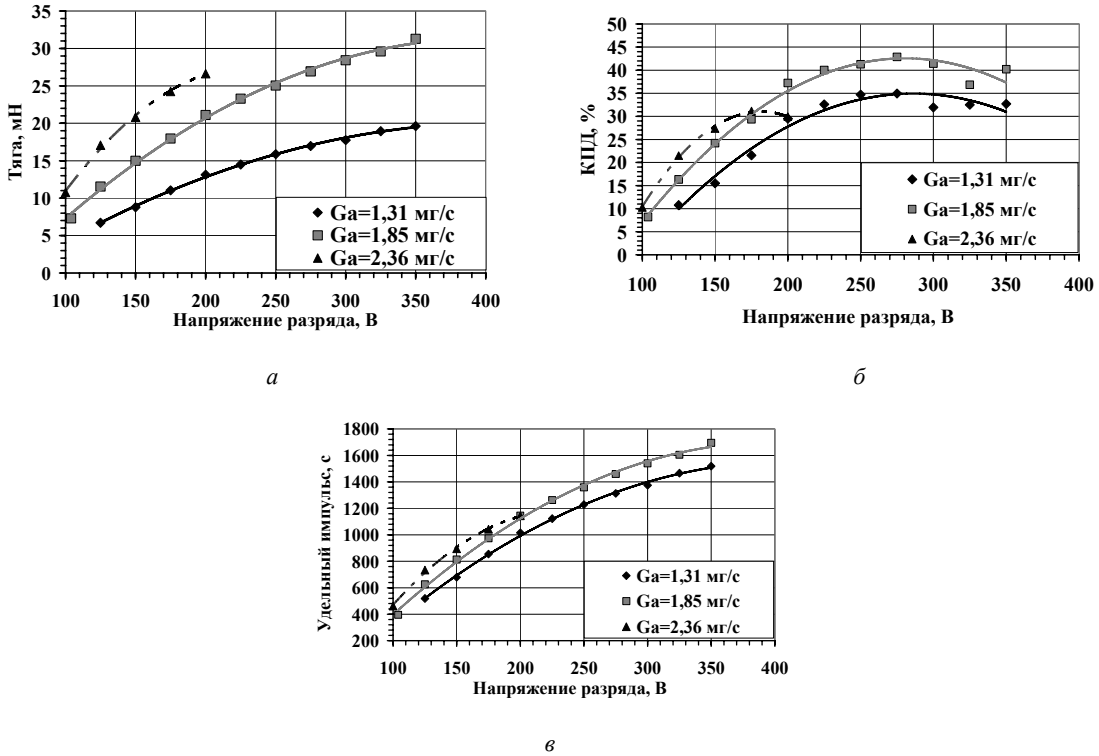
Приведенные результаты получены при ширине УК в зоне ионизации между керамическими кольцами 9 мм.

Как видно, при такой ширине УК в области малых разрядных напряжений и, соответственно, мощности разряда, удельный расход явно недостаточен, особенно для режима с разрядным током 1 А, и его предпочтительней в дальнейшем увеличить путем сужения ширины канала до 8 мм.

На втором этапе были проведены 200-часовые ресурсные испытания, по результатам которых спрогнозирован предельно достижимый ресурс.

По оценкам толщины изолятора в поперечном направлении РК 3 мм достаточно для обеспечения ресурса не менее 3 000 ч на режиме $U_р$ = 200 В и $I_р$ = 1,0 А.

При мощности же 400 Вт (на режиме $U_р$ = 280 В и $I_р$ = 1,4 А) для обеспечения ресурса 1 500 ч потребуется увеличение толщины наружной стенки изолятора РК как минимум до 3,5 мм.



а *б*

в

Рис. 6. Зависимость от напряжения разряда при переменной мощности от 100 до 580 Вт:
а – тяги; *б* – КПД; *в* – удельного импульса ПлаС-40

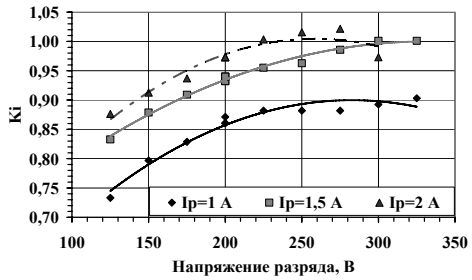


Рис. 7. Зависимость коэффициента ионизации от напряжения разряда для прототипа ПлаС-40

В результате проведенных работ по исследованию влияния газораспределения как в азимутальном направлении УК, так и по всему объему РК, за счет выбора мест размещения каналов и различных способов подачи РТ в разных по типоразмеру и мощности ЭРД, выполненных при одних и тех же условиях испытаний, определено, что есть возможность повысить эффективность работы двигателя за счет предельного приближения каналов подачи РТ непосредственно к входу УК с ориентацией направления впрыска части РТ вдоль границы названного входа. Такой результат получен при комбинированной одновременной прямоточной подаче части РТ из глубины РК – через центральную секцию и радиальной боковой подаче оставшейся части РТ – через наружную секцию, т. е. когда дополнительно обеспечивается объемное распределение рабочего газа. Сравнительный анализ различных способов подачи РТ в модели SPT-1 продемонстрировал, что лучшая эффективность работы ЭРД достигается при дополнительном использовании боковых подач РТ. При этом зафиксированы прямо противоположные тенденции поведения основных параметров и характеристик при повышении разрядных напряжений для гибридных двигателей в сравнении с СПД. На малоразмерной модели проверена и подтверждена возможность повышения эффективной работы ЭРД при организации только радиальной боковой подачи РТ, максимально приближенной к входу в зону ионизации с внешней стороны полого анода-газораспределителя. Полученные результаты свидетельствуют о возможности уменьшения глубины РК. Наилучшие показатели по критерию коэффициента ионизации достигаются в узко ограниченном диапазоне значений от 0,95 до 1,15, при этом стабилизация коэффициента ионизации при повышении разрядных напряжений наблюдается при значении ~1,18. При уменьшении протяженности УК и объема анодной полости непосредственная подача части РТ у границы зоны ионизации в радиальном и обратно-прямоточном направлениях также позволяет реализовать объемное распределение подаваемого в РК ЭРД рабочего газа, что способствует повышению стабильности и уровня удельных параметров и характеристик ЭРД на 15–25 %.

Библиографические ссылки

1. Гопанчук В. В., Потапенко М. Ю. Анализ современных ЭРД с высоким удельным импульсом тяги // Авиация и космонавтика – 2010 : 9-я Междунар. конф. СПб. : Мастерская печати, 2010. С. 177–178.

2. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1989.

3. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. 2-е изд., испр. и доп. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.

4. Бугрова А. И., Ким В. П. Современные состояние физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. М. : Наука, 1984.

5. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов : пат Рос. Федерации № 2191487, кл. H05H1/54, F03H 1/00 / В. В. Гопанчук ; опубл. 30.10.00, Бюл. № 29.

6. Hofer Richard R., Peterson Peter Y., Gallimore Alec D. A High Specific Impulse Two-Stage Hall Thruster with Plasma Lens Focusing // IEPC-01-036, 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena. CA, 2001.

7. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов : пат. Рос. Федерации № 2371605, кл. F03H 1/00 / В. В. Гопанчук, В. С. Жасан, Н. А. Семенова ; опубл. 16.06.2008, Бюл. № 30.

V. V. Gopanchuk, V. S. Zhasan, M. Yu. Potapenko

INCREASE OF EFFICIENCY OF GAS DISTRIBUTION IN THE ACCELERATING CHANNEL OF AN ELECTROJET ENGINE

The article presents results of researches of the influence of modes of gas feeding to a cavity of a discharge chamber on the basis critical parameters and characteristics of electrojet engines. Increase of operating effect of electroget engines is reached at the expense of, first, additional distribution of gas on depth of the discharge chamber by placing ports of injection of gas directly to an input in an ionization zone, and, secondly, by orientation of ports of injection of gas so that submitted gas mainly moved along an input in an ionization zone. Tests were spent on models of a various standard size in a range of working capacities from 100 Vt to 2,3 kw, including modes of operation at high discharge voltage.

Keywords: electrojet engine, stationary plasma engine, hybrid plasma engine, discharge chamber, anode-gas-distributor, ionization factor.

© Гопанчук В. В., Жасан В. С., Потапенко М. Ю., 2011

УДК 629.7.017.1

А. В. Кацура

ПРИМЕНЕНИЕ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Обобщение информации по техническому состоянию длительно эксплуатируемых летательных аппаратов и анализ отказов свидетельствуют о том, что очень важным является учет факторов коррозионной стойкости конструкции.

Ключевые слова: коррозионное поражение, прочность, коррозионно-усталостная долговечность.

Сложные технические системы могут быть классифицированы в виде трех состояний:

1) новая конструкция – обозначим это состояние как 0;

2) зачищенная от коррозии конструкция – это состояние 1;

3) замененная конструкция – обозначим как 2.

Не все указанные здесь состояния связаны с переходом друг в друга. Совершенно очевидно, что зачищенная конструкция уже не может возвратиться в состояние «новая». Зачистка производится в местах видимой коррозии, но остается еще много мест, где коррозия не видима, но уже имеет место [1].

Невозможен переход из состояния 2 в состояние 0. Это связано с тем, что замена обшивки сопровождается заменой конструктивных элементов. Кроме того, обшивка панели может быть заменена не целиком, а только частично, в местах обнаруженных коррозионных поражений.

Таким образом, схема переходов из одного состояния в другое, в общем случае, представлена на рис. 1.

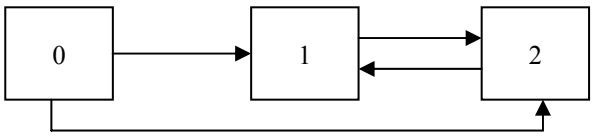


Рис. 1. Схема переходов

При подсчете вероятностей переходов было учтено, что конструкция может переходить из состояния 1 в состояние 1, т. е. оставаться в состоянии 1, если производится повторная зачистка, а может переходить из состояния 2 в состояние 2, если повторная замена производится без фиксации состояния 1.

Соответственно имеет место следующая матрица переходов и переходных вероятностей (указаны в скобках):

Было / Стало	0	1	2
0	00 (P_{00})	01 (P_{01})	02 (P_{02})
1	10 (P_{10})	11 (P_{11})	12 (P_{12})
2	20 (P_{20})	21 (P_{21})	22 (P_{22})

Вероятность перехода P_{00} означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция находилась в состоянии «новая» и при поступлении в очередной ремонт она также не нуждается в зачистке или замене.

Вероятность перехода P_{01} означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция наводилась в состояние «новая», а на следующем ремонте требует зачистки. Вероятность P_{02} означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция находилась в состоянии «новая» и требует замены на следующем ремонте (без промежуточной зачистки).

Вероятность P_{11} означает вероятность того, что на предыдущем ремонте конструкция была зачищена и при поступлении в очередной ремонт вновь требует зачистки.

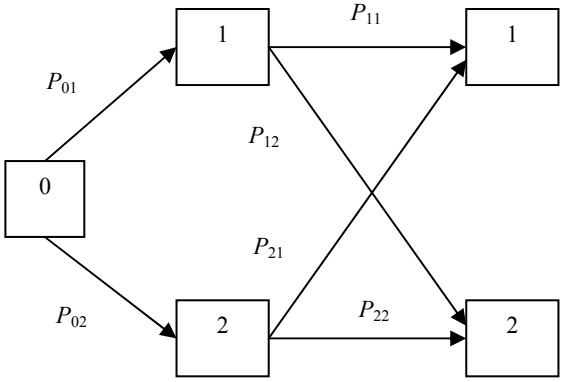


Рис. 2. Иллюстрация схемы переходов из одного состояния в другое

Аналогично: P_{12} – означает вероятность перехода из состояния 1 в состояние 2; P_{21} – вероятность перепада из состояния 2 в состояние 1 и P_{22} – вероятность перехода из состояния 2 в состояние 2.

Указанные матрицы представляли бы однородную цепь Маркова, если бы переходные вероятности P_{ij} зависели только от предыдущего состояния. При этом исчисления наработки панели надо было бы вести от предыдущего состояния к последующему. Пусть, например, наработка с начала эксплуатации при состоянии 2 есть T_2, и состояние 2 перешло в состояние 1. Пусть наработка с начала эксплуатации в состоянии 1 есть T_{21}, тогда наработка при переходе 2–1 составит

($T_{21} - T_2$). Такой подход был бы правильным, если замена или зачистка полностью охватывала бы рассматриваемую зону, или если бы при дальнейшей дефектации координаты коррозии жестко фиксировались и лежали в области замены или зачистки.

На самом деле это не так. Зачистка выполняется лишь в местах появления коррозии и остается еще много площадок с необнаруженной коррозией. При дальнейшей дефектации коррозия может быть обнаружена вне зоны зачистки и нет возможности строго зафиксировать ее координаты, сказанное относится и к процессу замены (состояние 2). Это означает, что, например, переход 2–1 зависит не только от предыдущего состояния 2, но и от наработки самолета с начала эксплуатации. Здесь надо добавить, что необнаружение коррозии не означает ее полного отсутствия, а длительность эксплуатации оказывает существенное влияние на зачаточные коррозионные повреждения.

Сведение немарковских параметров системы к марковским. С теоретической точки зрения любой случайный процесс можно представить как процесс Маркова: для этого достаточно в понятие «состояние» включить всю предысторию поведения системы. Следовательно, о возможности аппроксимации Маркова необходимо судить с 2-х позиций: насколько точно модели Маркова отражают реальный характер случайных процессов и насколько сложны сами модели. Аппроксимация Маркова возможна, если потоки возникновения и устранения отказов и неисправностей являются простейшими, т. е. удовлетворяются условия ординарности и стационарности. Для определения вероятностей состояний P_i возможна замена реальных функций распределения $F_i(t)$, характеризующих потоки, переводящие системы ЛА из одного состояния в другое, на экспоненциальные при условии равенства их первых моментов [2]. В некоторых случаях, вместо замены реальных законов распределения экспоненциальными путем приравнивания их математических ожиданий, можно использовать способ введения фиктивных состояний и представлений исследуемых процессов как кусочно-однородных. Зная характер изменения интенсивности потоков отказов, можно для каждого периода принять их постоянными ω_1, ω_2 и ω_3 (что соответствует замене монотонно изменяющихся функций ступенчатыми) и решить ряд независимых задач для каждого периода. Но в этом случае возникает необходимость нахождения значений ω_1, ω_2, ω_3 и длительности периодов T_1 и T_3 по имеющимся статистическим данным. В соответствии со сказанным, вероятность перехода P_{ij} следует рассматривать как функцию $P_{ij}(T)$ от наработки T с начала эксплуатации.

Фактически речь идет об условной вероятности переходов, при условии, что известна наработка с начала эксплуатации. В нашем случае производится замена вероятностных переходов P_{01} и $P_{12}(P_{21})$ на кусочно-однородные процессы: P_{01} – необслуживаемая нерезервируемая система, $P_{12}(P_{21})$ – как непрерывно контролируемая нерезервируемая система [3].

Модель состояний необслуживаемых нерезервированных конструктивных элементов (КЭ) летательных аппаратов (ЛА). Для необслуживаемых нерезервированных КЭ ЛА характерными состояниями являются: 1 – готовность к работе (Г); 2 – отказа (О).

В связи с невозможностью выявления и устранения возникших в процессе эксплуатации отказов будет иметь место лишь одно направление перехода: из состояния 1 в состояние 2 (1–2). Ориентированный граф состояний таких КЭ представлен на рис. 3.

Состояние 2 является поглощающим, и поведение этих КЭ описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -a_{12}P_1(t)\,; \qquad (2)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = a_{12}P_1(t)\,.$$

Интенсивность перехода a_{12} по своей физической сущности представляет собой интенсивность отказов λ необслуживаемого КЭ:

$$a_{12} = \lambda.$$

Используя преобразование Лапласа, от системы дифференциальных уравнений (2) перейдем к системе алгебраических уравнений:

$$SP_1(S) - P_1(0) = -\lambda P_1(S);$$
$$SP_2(S) - P_2(0) = \lambda P_1(S).$$

Из данной системы найдем выражение для $P_1(S)$:

$$P_1(S) = \frac{P_1(0)}{S+\lambda}\,.$$

Перейдя к оригиналу, окончательно получим

$$P_1(t) = P_1(0)\,e^{-\lambda t}. \qquad (3)$$

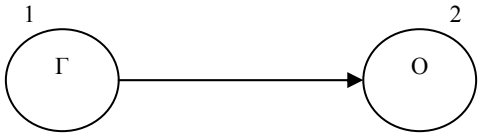


Рис. 3. График состояний необслуживаемых нерезервированных КЭ ЛА

В модели необслуживаемых КЭ (рис. 3) переменной является интенсивность отказов λ. Значение вероятности $P_1(0)$ принимается равным оценке, полученной теоретическим путем или при заводских испытаниях. Характер изменения вероятности P_1 застать КЭ в состоянии готовности к работе показан на графиках (рис. 4), построенных по исходным данным, приведенным в табл. 1 (значение $P_1(0)$ принято равным единице, что, как правило, имеет место при теоретических расчетах и является явно завышенной оценкой).

Из этих графиков видно, что даже при малых, трудно достижимых значениях $\lambda = 10^{-6}$ 1/ч вероятность P_1 готовности необслуживаемого КЭ к работе

уже после одного года эксплуатации снижается до недопустимо малых значений ($P_1(T$ = 8 760 л. ч.) = = 0,9913). Это указывает на необходимость тщательной обработки статистических данных для оценки по результатам испытаний необслуживаемых КЭ с целью подтверждения правильности принятого главным конструктором решения о его необслуживаемости в процессе эксплуатации.

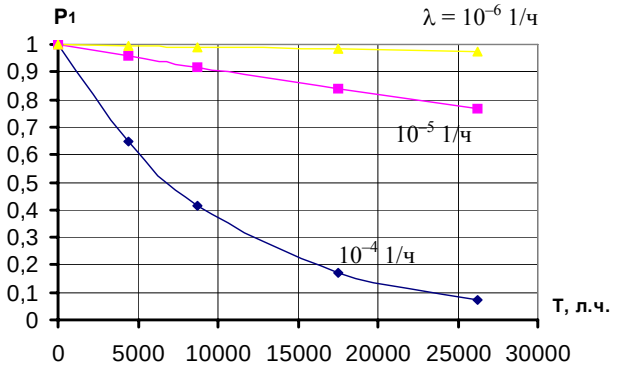


Рис. 4. Зависимость вероятности P_1, перехода $P_{(01)}$ от времени эксплуатации

Таблица 1

Вероятность P_1 нахождения КЭ в состоянии готовности к применению

λ, 1/ч	T, л. ч.			
	4 380	8760	17 520	26279
10^{-4}	0,6453	0,4164	0,1734	0,072
10^{-5}	0,9571	0,9161	0,8393	0,7689
10^{-6}	0,9956	0,9913	0,9826	0,9741

Модель состояний непрерывно контролируемых нерезервированных конструктивных элементов летательных аппаратов. Для непрерывно контролируемых в процессе эксплуатации нерезервированных КЭ ЛА модель системы ТО имеет простейший вид (рис. 5). В любой произвольный момент времени такие КЭ могут находиться в одном из двух состояний: 1 – готовности к работе (Г); 2 – отказа (О).

Наличие непрерывного контроля технического состояния КЭ позволяет в случае возникновения отказа (переход 1–2) немедленно приступить к восстановлению его готовности (переход 2–1).

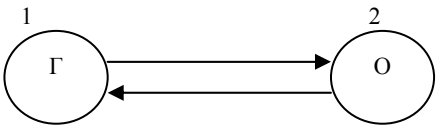


Рис. 5. График состояний непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ ЛА

Система дифференциальных уравнений для представленной на рис. 5 модели будет иметь следующий вид:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -a_{12}P_1(t) + a_{21}P_2(t); \qquad (4)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -a_{21}P_2(t) + a_{12}P_1(t).$$

Используя преобразование Лапласа, перейдем от системы дифференциальных уравнений (4) к системе алгебраических уравнений, что позволит получить выражение для вероятности $P_1(t)$ нахождения КЭ в состоянии 1 готовности к работе (при начальном условии $P_1(0) = 1$):

$$P_1(t) = \frac{a_{21}}{a_{12}+a_{21}} + \frac{a_{12}}{a_{12}+a_{21}} \cdot e^{-(a_{12}+a_{21})t} = \\ = \frac{\mu}{\varpi_{\text{нп}}+\mu} + \frac{\varpi_{\text{нп}}}{\varpi_{\text{нп}}+\mu} \cdot e^{-(\varpi_{\text{нп}}+\mu)t}. \qquad (5)$$

где $a_{12} = \varpi_{\text{нп}}$; $a_{21} = 1/T^{\text{нп}}_{\text{устр}} = \mu$; $\varpi_{\text{нп}}$ – параметр потока отказов непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ; $T^{\text{нп}}_{\text{устр}}$ – среднее время устранения отказов; μ – интенсивность восстановления.

В стационарном режиме эксплуатации ($t \to \infty$) система уравнений (4) вырождается в систему алгебраических уравнений

$$-a_{12}P_1 + a_{21}P_2 = 0; \qquad (6)$$
$$a_{12}P_1 - a_{21}P_2 = 0,$$

из которой с учетом нормировочного условия $P_1 + P_2 = 1$ получаем

$$P_1 = \frac{\mu}{\varpi_{\text{нп}}+\mu}. \qquad (17)$$

Выражения (5) и (7) широко известны из литературы по теории надежности и эксплуатации [4]. Но при этом модели Маркова позволяют получить еще целый ряд показателей качества систем ТО (F_i, p_{ij}, μ_i и др.).

В модели непрерывно контролируемых нерезервированных КЭ и систем ЛА вектор эксплуатационных характеристик $\bar{x}$ включает две характеристики: $\omega_{\text{нп}}$ и $T^{\text{нп}}_{\text{устр}}$ (или μ). Графики изменения вероятности P_1 готовности КЭ к работе приведены на рис. 6, они построены по исходным данным табл. 2. Из них видно, что при $\omega_{\text{нп}} \le 10^{-5}$ 1/ч вероятность P_1 практически не зависит от времени устранения отказов в реальном диапазоне их изменения [5].

Таблица 2

Вероятность P_1 нахождения КЭ в состоянии готовности к применению

$T^{\text{нп}}_{\text{устр}}$, ч	ω, 1/ч		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
10	0,9901	0,9990	0,9999
25	0,9756	0,9975	0,9998
50	0,9524	0,9950	0,9995
100	0,9091	0,9901	0,9990

Так, при изменении $T^{\text{нп}}_{\text{устр}}$ на 90 % (с 10 до 100 ч) вероятность P_1 изменяется всего лишь на 0,09 %. Однако при $\omega_{\text{нп}} > 10^{-5}$ 1/ч картина меняется: изменение $T^{\text{нп}}_{\text{устр}}$ на 90 % при $\omega_{\text{нп}} = 10^{-4}$ 1/ч приводит к изменению P_1 на 0,9 %, а при $\omega_{\text{нп}} = 10^{-3}$ 1/ч – на 8 %. Следовательно, в ходе проведения испытаний исходя из достигнутого уровня $\omega_{\text{нп}}$ требования к точности

нахождения оценки времени $T^{нп}_{устр}$ и, следовательно, числу испытаний должны быть различны для значений $\omega_{нп} \le 10^{-5}$ 1/ч и $\omega_{нп} \ge 10^{-5}$ 1/ч.

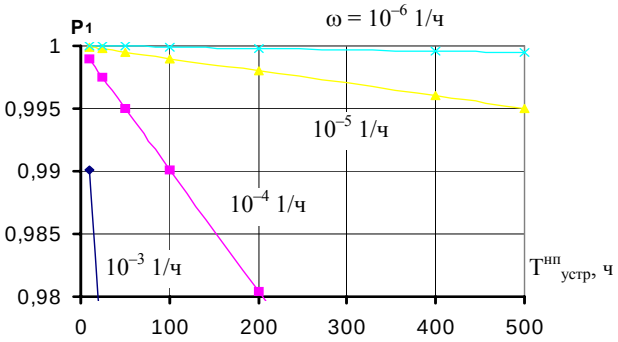


Рис. 6. Зависимость вероятности P_1, перехода P_{12}, от времени устранения отказов

Таким образом, создание матрицы вероятностей переходов из одного состояния в другое позволяет осуществлять прогнозирование развития коррозионных поражений и оценивать минимальный, средний, максимальный объем работ и расход материальных ресурсов, связанных с устранением коррозии при поступлении ЛА в ремонт.

Сведение немарковских параметров системы к Марковским и представление исследуемых процессов как кусочно-однородных позволило провести оценку вероятности P_1 нахождения систем панелей обшивки фюзеляжа в состоянии готовности к применению по назначенному техническому обслуживанию и определить вероятность работоспособности конструктивных элементов для самолетов типа Ан-24**.**

Библиографические ссылки

1. Акимов Г. В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М. : Из-во АН СССР, 1945.

2. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. Е., Каштанов В. А. Вопросы математической теории надежности. М. : Радиоисвязь, 1983.

3. Герцбах Н. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов. М. : Сов. радио, 1966.

4. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности. М. : Наука, 1965.

5. Голего Н. Л. Ремонт летательных аппаратов. М. : Транспорт, 1977.

A. V. Katsura

USE OF METHODS OF NONDESTRUCTIVE TEST FOR EXPOSURE OF CORROSION DAMAGE OF THE AIRFRAME STRUCTURE WITH ACCOUNT OF CORROSIVE DAMAGE CRITERIA

From the analysis of the tasks caused by the necessity to mitigate and prevent the effects of corrosion during a scheduled service, the most important one is to define the limits of corrosion damage.

Keywords: corrosion damage, corrosion resistance, corrosion fatigue life, corrosion ulcer.

© Кацура А. В., 2011

УДК 532.542:621.67-762:62

М. В. Краев, И. С. Протевень

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ЧАСТИЧНО СМОЧЕННОГО ДИСКА С РАДИАЛЬНЫМИ ЛОПАТКАМИ*

На основе представлений картины течения рабочей жидкости в каналах диска с лопатками выполнен расчет основных параметров границы раздела «жидкость–газ» с подтвержденными экспериментальными данными.

Ключевые слова: диск, вращение, каналы, поверхность, граница, жидкость–газ.

Высокооборотные насосные агрегаты (НА) широко применяются в качестве агрегатов для подачи жидких рабочих тел в энергодвигательных установках летательных аппаратов (ЛА), ротор которых состоит из различных типов рабочих колес, дисков, систем уплотнений и т. п. [1].

Вопросам исследования гидродинамики по торцевой поверхности вращающегося диска посвящены работы [2–4], авторы которых принимают в расчетах, что границы раздела жидкостной и газовой фаз представляют собой размытую цилиндрическую поверхность. Такая неопределенность с положением расчетных параметров вносит существенную погрешность при расчете элементов вспомогательного гидравлического тракта насосного агрегата [5].

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: ФПЦ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № П231 от 23.04.2010 и АВЦП РНП ВШ № 2.1.2/802.

Картина течения между вращающимся диском с торцовыми лопатками (рис. 1) и гладким корпусом довольно сложна [1]. Жидкость, находящаяся в области каналов, подвергается непосредственному силовому воздействию лопаток. При бесконечно большом числе лопаток жидкость в межлопаточном пространстве РК будет вращаться как твердое тело с окружной скоростью $\omega_ж$. Уравнение равновесия элементарного объема жидкости, расположенного межлопаточном пространстве на радиусе R толщиной dR в системе координат, скрепленной с этим объемом:

$$dp - \rho_ж \omega^2 R dR = 0, \qquad (1)$$

где второй член левой части уравнения характеризует величину центробежной силы.

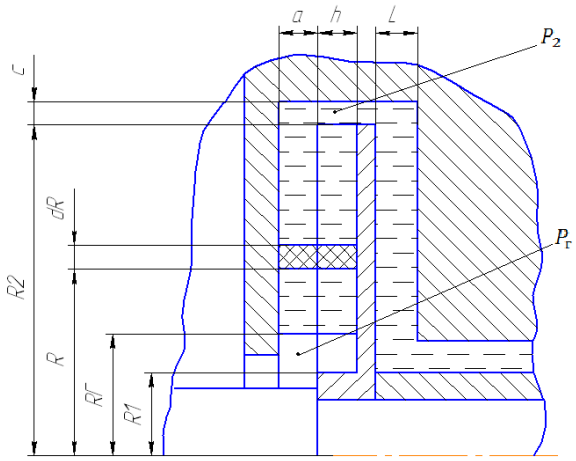


Рис. 1. Диск с лопатками (к принципу работы)

Интегрируя уравнение (1) в пределах от $R_г$ до R_2, получим величину избыточного теоретического давления на внешнем радиусе диска:

$$\Delta p_2 = p_2 - p_г = \rho_ж \omega^2 \left(R_2^2 - R_г^2\right)/2. \qquad (2)$$

Как показали экспериментальные исследования, жидкость закручивается в области зазора со стороны лопаток со скоростью, меньшей скорости вращения диска. Зависимость между угловой скоростью жидкости $\omega_ж$ и диска ω имеет вид

$$\omega_ж = \varphi\omega. \qquad (3)$$

Тогда зависимость между давлением на периферии диска и радиусом границы раздела фаз $R_г$ может быть выражена в следующем виде:

$$p_2 - p_г = \rho_ж \omega_ж^2 \varphi_ж^2 \left(R_2^2 - R_г^2\right)/2. \qquad (4)$$

Поскольку коэффициент закрутки потока φ < 1, и всегда имеет место относительное движение жидкости и лопаток диска, что непременно приводит к образованию в каналах циркуляционной зоны, как следствие обтекания потоком впадин. В относительном движении жидкость обтекает каналы со скоростью

$$W = \left(U - U_ж\right) = U\left(1 - \varphi_ж\right). \qquad (5)$$

Известно, что при течении жидкости в канале за плохо обтекаемым телом (в нашем случае каналы и лопатки диска) возникают отрывные течения. Отрывное течение характеризуется образованием возвратных потоков и вихрей. Этот процесс в большей мере определяется отношением глубины впадины, толщиной пограничного слоя на стенке перед каналом и относительной высотой стенок канала. Взаимодействие между струей и жидкостью в канале приводит к появлению циркуляционного течения в зоне за выступом [6].

Сдвиговые течения в окружном направлении, в виде отставания закрученного потока в осевом зазоре компенсируются радиальным (расходным) течением в области каналов от центра к периферии, что характеризуется соотношением радиальной составляющей скорости V_R в канале от окружной V_U. Это дает основание выразить скорости радиального (расходного) течения жидкости в канале с учетом угловой скорости жидкости в окружном направлении в виде

$$V_R = \omega_ж \cdot R \cdot K, \qquad (6)$$

где K – экспериментальный коэффициент $K = 0{,}18 \pm 0{,}03$.

С учетом различной геометрии радиальных каналов диска зависимости для средней скорости радиального расходного течения на радиусе R в каналах числом z, постоянной ширины b и глубиной h получим в виде

$$V_R = \frac{2\pi\omega R^2 a \cdot K \cdot \varphi_л}{b \cdot h \cdot z}, \qquad (7)$$

для диска с лопатками постоянной толщиной δ:

$$V_R = \frac{2\pi\omega R^2 a \cdot K \cdot \varphi_л}{h(2\pi R - z \cdot \delta)}. \qquad (8)$$

Расходное течение в каналах диска сопровождается сдвиговым потоком по аналогии с рабочим колесом центробежного насоса, что приводит в каналах диска к сдвигу поверхности раздела фаз «жидкость–газ». Для получения отпечатков и анализа течения в области осевого зазора и каналов диска в рабочую жидкость вводились примеси, которые осаждались на поверхности диска. Такой примесью в опытах авторов [7] служила вакуумная замазка, предварительно расплавленная в горячей воде. Кроме того, проводились испытания при подаче в центральную полость нагретого газового потока с высоким содержанием сажи, частицы которой осаждались на диске только в области свободной жидкости.

На фотографии, представленной на рис. 2, видно, что жидкость с напорной стороны канала опускается ниже границы раздела фаз $R_г$, имеющей место в зазоре a, на величину сдвига ΔR.

Исходя из представленной физической модели радиального одномерного течения жидкости в каналах, рассмотрим равновесие элементарного объема жидкости в канале у поверхности «жидкость–газ» (рис. 3). На выделенный объем жидкости массой dm действует центробежная сила инерции $dm\omega^2 R$ и кориолисова $dm2\omega V_R$. Сумма проекции всех сил, действующих на элемент с учетом, что $dR/db = \mathrm{tg}\alpha$, запишется:

$$2V_R \cdot db - \omega \cdot R \cdot dR = 0 . \qquad (9)$$

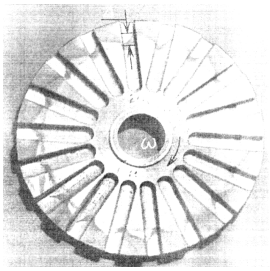


Рис. 2. Диск с радиальными лопатками

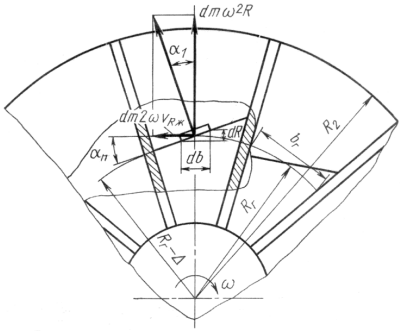


Рис. 3. Расчетная схема положения границы раздела «жидкость–газ» по ширине канала вращающегося диска

Интегрируя уравнение (9) при условии, что давление в газовой полости – величина постоянная и равна давлению на границе раздела фаз, получим:

$$\frac{\omega}{2}\left[R_{\text{г}}^2 - \left(R_{\text{г}} - \Delta R\right)^2\right] = 2b_{\text{г}} \cdot V_R . \qquad (10)$$

С учетом выражений (7) и (8) уравнение для определения величины сдвига границы раздела фаз частично смоченного вращающегося диска получим в виде:

$$\Delta R = R_{\text{г}}\left(1 - \sqrt{\frac{25{,}12aK\varphi_{\text{л}}}{z \cdot h}}\right). \qquad (11)$$

Для одномерного расходного течения по ширине канала диска величиной b равнодействующая всех сил на границе раздела фаз уравновешивается силой давления прилегающих слоев жидкости, и поэтому поверхность жидкости нормальна к этой равнодействующей, что обусловливает сдвиг поверхности раздела фаз под углом:

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{dm\omega \cdot V_R}{dm\omega^2 R} = \frac{2V_R}{\omega R} . \qquad (12)$$

Для величины сдвига по границе раздела фаз на радиусе диска $R_{\text{г}}$ в канале величиной b можно записать:

$$\Delta R = \frac{2b_{\text{г}} \cdot V_R}{\omega R} . \qquad (13)$$

Для границы раздела фаз величины $R_{\text{г}}$ имеем:

$$\Delta R = \frac{4\pi R_{\text{г}} \cdot a \cdot K \cdot \varphi_{\text{л}}}{h \cdot z} . \qquad (14)$$

По полученным зависимостям (11) и (14) с учетом экспериментальных значений $k_{R_{\text{ж}}} = 0{,}18$ и $\varphi_{\text{л}} = 0{,}8$ были просчитаны величины сдвига ΔR для различных дисков в широком диапазоне изменения режимов их работы (см. таблицу).

В таблице представлены результаты расчетов и экспериментальные значения величины ΔR при испытании на различных рабочих жидкостях в широком диапазоне изменения угловой скорости диска с разной формой каналов. Как видно из таблицы, расчетное значение величины сдвига поверхности жидкости в каналах диска удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Величины сдвига ΔR для различных дисков в широком диапазоне изменения режимов их работы

Форма канала	ω, рад/с	Рабочая жидкость. Плотность, кг/м^3	$R_{\text{г}}$, мм	$\Delta R^*_{\text{экспер}}$, мм	$R_{\text{г}}$, мм
Л	2 620	Этиловый спирт, 800	29	2,1–2,3	2,48
П	2 140	Вода, 1000	34	3,6–3,8	3,42
П	2 040	– ‖ –	28	2,5–2,8	2,81
П	1 110	– ‖ –	34	3,2–3,5	3,42
П	1 050	– ‖ –	23	2,5–2,9	2,31
Л	2 100	– ‖ –	33	3,1–3,3	3,32
Л	1 110	– ‖ –	32	3,0–3,1	3,22
П	3 770	Азотная кислота, 1 140	22	2,0–2,2	2,21

Примечание: * Ввиду размытой границы следа измерялось два значения Δ – по верхней и нижней границе; Л – лопатка постоянной величины, П – паз постоянной величины.

Библиографические ссылки

1. Краева Е. М. Высокооборотные насосы аэрокосмических систем малого расхода : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.

2. Кетола Н., Мак-Грью М. Теория частично смоченного вращающегося диска // Проблемы трения и смазки : труды АОИМ. М. : Мир, 1986. Т. 30. Сер. F. № 2. С. 86–102.

3. Third M. T., Saunders M. G. The hydrodynamic disk seal. Third international conference on flied sealing. England : Cambridge, 1967. P. 97–124.

4. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960.

5. Байбиков А. С., Карахатьян В. К. Гидродинамика вспомогательного тракта лопастных машин. М. : Машиностроение, 1982.

6. Краев М. В., Краева Е. М. Исследование вихревых турбулентных потоков в поле центробежных сил // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30). 2010. С. 111–114.

7. Краев М. В., Овсяников Б. В., Шапиро А. С. Гидродинамические радиальные уплотнения высокооборотных валов. М. : Машиностроение, 1967.

M. V. Kraev, I. S. Proteven

THE STRUCTURE OF THE INTERFACE PARTIALLY WET DISC WITH RADIAL VANES

Based on the representations of the flow pattern of the working fluid in the channels of the disc with blades, we calculated the main parameters of the «liquid–gas», with proven experimental data.

Keywords: disc, rotation, channels, surface, border, liquid–gas.

© Краев М. В., Протевень И. С., 2011

УДК 621.45–181.4:629.78

Е. М. Краева

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В РЕШЕТКЕ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ГИДРОМАШИНЫ*

Представлен расчет потока вязкой жидкости решетки профилей лопаток центробежного рабочего колеса. Получены зависимости изменения параметров пограничного слоя вдоль входных кромок лопаток решетки профилей центробежной гидромашины. Выполнены расчеты с учетом вязкости для ряда рабочих вязкостей.

Ключевые слова: гидродинамика потока, модель, турбулентность, параметры, поток, вязкость, рабочая решетка, лопатка.

Из анализа различных схем обтекания лопаток центробежных насосов (ЦБН) [1; 2] рассмотрим схему малорасходного режима, когда точка раздвоения линии тока совпадает с угловой точкой *E* (рис. 1, поз. II), в которой пересекаются входная и боковая кромки профиля лопатки.

Поток в каналах рабочего колеса (РК) ЦБН формируется при обтекании входных кромок лопаток, имеющих конечную толщину $\delta_л$ с прямой формой входной кромки или в виде клина длиной $l_{кл} \le 10$ мм, величиной $\sigma_1 \le 2$ мм, образуемой в результате пересечения лопатки с окружностью входа в РК радиусом R_1 и углом установки $\beta_{1л}$ средней линии профиля лопатки. На напорной стороне лопатки пограничный слой не только определяется характеристиками набегающего потока, но и оказывает на него обратное влияние через толщину вытеснения δ*, что приводит к изменению гидродинамического угла установки лопатки от геометрического на величину $\Delta\beta_л$ (рис. 2).

Оценим влияние вытесняющего действия пограничного слоя в области входа на лопатку. С учетом толщины вытеснения пограничного слоя набегающего потока, угол натекания гидродинамического потока вязкой жидкости значением угла натекания потока составит:

$$\beta = \beta_{1л} + \operatorname{arctg}\frac{\delta^*}{l_{кл}}. \qquad (1)$$

где δ* – толщина вытеснения, которую можно оценить, используя известные из теории пограничного слоя соотношения при обтекании с градиентом давления [3].

Следует отметить, что конечная толщина лопатки и параметры ее входной кромки не только формируют поток на входе в межлопаточный канал, но и оказывают на него подтормаживающее действие за счет силы реакции *F* и стесняющее – за счет конечной толщины лопатки $\delta_л$ с учетом суммарной площади лопаток на входе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП НК-711 П.1.2.1. ГК № П231 от 23.04.2010 г. и при участии доктора технических наук М. В. Краева.

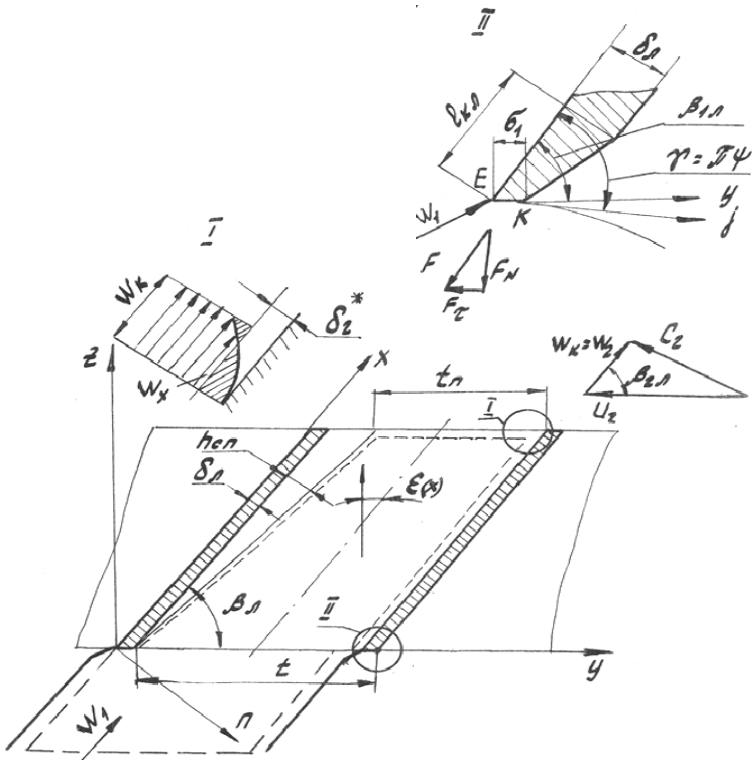


Рис. 1. Расчетная схема обтекания решетки прямых профилей

Полную силу F, действующую на поток со стороны кромки, можно разложить на две составляющие: F_N – нормальную к входной кромке и F_τ – касательную, которая представляет собой силу трения, определяемую вязкостью жидкости. Сила F_N рассчитывается по закону распределения давления вдоль входной кромки лопатки величиной σ_1:

$$F_N = \int_0^{\sigma_1} P dj. \qquad (2)$$

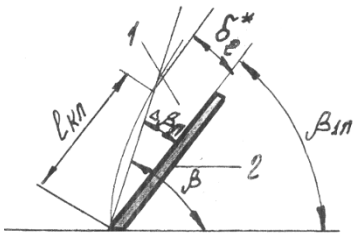


Рис. 2. Расчетная схема угла натекания потока на лопатку: *1* – пограничный слой; *2* – лопатка

Рассмотрим, следуя авторам работы [1], обтекание лопатки с входной кромкой, которая может не совпадать с фронтом решетки, как обтекание окрестности передней критической точки клинообразного тела с углом раствора $\gamma = \pi\psi$. Согласно [3], скорость потенциального течения в ядре потока вдоль входной кромки будет иметь вид

$$W_{(j)} = Cj^m, \qquad (3)$$

где C и m – постоянные величины,

$$m = \frac{\Psi}{2-\Psi} = \frac{\gamma}{2\pi-\gamma}. \qquad (4)$$

При совпадении входной кромки с осью Y ($\gamma = \beta_{1л}$):

$$m = \frac{\beta_{1л}}{2\pi-\beta_{1л}}. \qquad (5)$$

Тогда для клина с углом раствора $\pi\psi$ и длиной одной стороны входной кромки лопатки равной σ_1 при $j = \sigma_1$; $W_{(j)} \approx W_K$ из уравнения (3) получим:

$$C = \frac{W_K}{\sigma_1^m}; \qquad (6)$$

и запишем уравнение (3) следующим образом:

$$W_{(j)} = \frac{W_K}{\sigma_1^m} j^m. \qquad (7)$$

Решение уравнения пограничного слоя проводим с учетом градиентного обтекания лопатки, принимая согласно [4], что по всей длине входной кромки σ_1 пограничный слой ламинарный. Для оценки закона изменения толщины потери импульса δ_1^{**} вдоль входной кромки лопатки используем выражение из работы [3], сведенное к простой квадратуре:

$$\left(\delta_1^{**}\right)^2 = \frac{0,47\nu}{W_{(j)}^6} \int_0^j W_{(j)}^5 dj. \qquad (8)$$

Откуда, с учетом (7), имеем

$$\delta_1^{**} = 0,686\sqrt{\frac{\sigma_1^m \nu j^{(1-m)}}{W_K\left(5m+1\right)}}. \qquad (9)$$

Используя табличную функцию $f_1(æ)$, предложенную Г. Хольштейном и Т. Боленом [3], принимаем

$$f_1(æ) = \frac{\delta^*}{\delta^{**}}, \qquad (10)$$

тогда изменение толщины вытеснения пограничного слоя δ_1^* вдоль входной кромки лопатки запишем в виде

$$\delta_1^* = f_1\left(æ\right)\delta_1^{**}, \qquad (11)$$

где значение формпараметра æ запишем следующим образом:

$$æ = \frac{\left(\delta_1^{**}\right)^2}{\nu}\cdot\frac{dW_{(j)}}{dj} = \frac{m}{\left(10,64m+2,128\right)}. \qquad (12)$$

Для постоянного угла заострения входной кромки лопатки $\gamma = \pi\psi$ из выражения (12) видно, что $f_1(æ)$ не изменяется вдоль всей входной кромки.

На примере конкретных РК ЦБН для входной кромки решетки профилей лопатки, касательной к окружности входа РК в точке Е ($\gamma = \beta_{1л}$), проведены расчеты изменения параметров пограничного слоя: толщины вытеснения δ_1^* и толщины потери импульса δ_1^{**} вдоль кромки лопатки в зависимости от значения относительной скорости набегающего потока W_y.

Рассчитанные по уравнению (7) значения изменения относительной скорости потока при обтекании решетки профилей с клином входной кромки РК параметров: R_1 = 8,25 мм, R_2 = 20,25 мм, шагом решетки $t_{1пр}$ = 14,95 мм и ширины b_1 = 4,3 мм приведены на рис. 3 для трех значений углов установки лопатки $\beta_{1л}$ = 18°; 30° и 40°. Скорость потока W_y вначале резко возрастает до 60…80 % на длине, составляющей 10 % всей кромки, а затем медленно увеличивается, достигая на остальной длине значения W_K. При этом следует отметить, что с ростом угла установки профиля темп нарастания скорости W_y уменьшается.

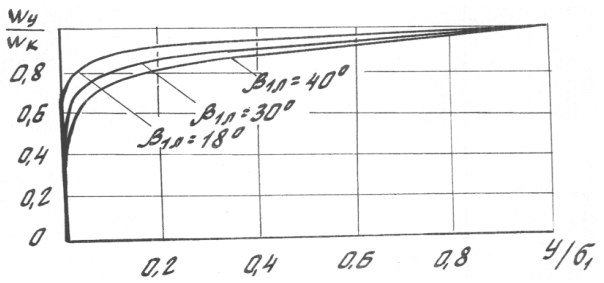


Рис. 3. Результаты расчета изменения $\left(\frac{W_y}{W_K}\right)$ на входе решетки профилей лопаток

Для широкого диапазона изменения параметров рабочих тел с вязкостью $\nu = 0,5\cdot10^{-6}\ldots1\cdot10^{-4}$ м^2/с проанализируем реальность перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный для РК с углом $\beta_{1л}$ = 30°; угловой скоростью ω = 800 рад/с и относительной скоростью потока W_1 = 3 м/с. Течение у входной кромки лопатки длиной σ_1 и вдоль ее напорной поверхности принимается эквивалентным обтеканию клина с углом раскрытия γ (рис. 1, поз. II).

Расчет устойчивости течения рассмотрим для профиля скоростей, рассчитанных способом К. Польгаузена с формой профилей, определяемых безразмерным параметром [3]:

$$\Lambda = \frac{\delta^2}{\nu}\frac{dW_y}{dy}, \qquad (13)$$

зависимость которого от критического числа Рейнольдса определяем по толщине вытеснения пограничного слоя:

$$\mathrm{Re}_{кр\delta^*} = \frac{W_{(y)}\delta^*}{\nu}. \qquad (14)$$

При значении $\mathrm{Re}_{\delta^*} > \mathrm{Re}_{кр\delta^*}$ ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный.

Между безразмерными параметрами æ (формула (12)) и Λ существует известное универсальное соотношение [3]:

$$æ = \Lambda\left(\frac{37}{315} - \frac{\Lambda}{945} - \frac{\Lambda^2}{9072}\right). \qquad (15)$$

Для входной кромки лопатки с углом $\beta_{1л} = \gamma = 30°$ расчеты по приведенным выше зависимостям дают m = 0,0908, тогда æ = 0,029, что соответствует Λ = 2,243 и $f_1(æ)$ = 2,457.

Имеем, что $\mathrm{Re}_{кр\delta^*} = 2,65\cdot10^3$ (рис. 17.3 работы [3]). Толщину вытеснения для конца участка клина ($j = \sigma_1$) оценим по выражению (9) и с учетом (10) получим

$$\delta^*_{1(30°)} = 1,398\left(\frac{\nu\sigma_1}{W_K}\right)^{0,5} \qquad (16)$$

или

$$\mathrm{Re}_{\delta^*} = \frac{W_K\delta_1^*}{\nu} = 1,398\left(\frac{W_K\sigma_1}{\nu}\right)^{0,5}. \qquad (17)$$

На основе анализа расчетной величины формпараметра (æ), в зависимости от m, в практическом диапазоне изменения углов установки лопатки от 18 до 40° рассмотрим влияние на толщину вытеснения пограничного слоя и значение $\mathrm{Re}\,\delta_1^*$. Из дальнейшего анализа для принятого угла $\beta_{1л}$ = 30° при $\mathrm{Re}_{кр\delta_1^*} = 2,65\cdot10^3$ и входной кромки σ_1 = 2 мм, получим: для воды ($\nu = 1\cdot10^{-6}$ м^2/с) $W_K = W_{Kкр}$ = 1598 м/с; для глицерина ($\nu = 1\cdot10^{-4}$ м^2/с) $W_K = W_{Kкр}$ = 1598 $\cdot10^2$ м/с. Следует отметить, что расчетные значения относительной скорости, при которой реализуется переход к турбулент-

ному пограничному слою, на три и более порядков выше реальных значений W_K по всей длине решетки профилей лопаток исследуемой центробежной гидромашины с параметрами: $\sigma_1 = 2$ мм и $l_{пр} = 18{,}6$ мм для вышеприведенных значений РК ($\beta_{1л} = 30°$; $\beta_{2л} = 70°$) ЦБН, работающего на ряде рабочих жидкостей. Расчетные значения изменения параметров толщины вытеснения δ_1^* и толщины потери импульса δ_1^{**} пограничного слоя вдоль рабочей решетки профилей лопаток центробежной гидромашины приведены на рис. 4 для ряда рабочих жидкостей: вода ($\nu = 1\cdot10^{-6}$ м^2/с; $\rho = 10^3$ кг/м^3), глицерин ($\nu = 1{,}18\cdot10^{-3}$ м^2/с; $\rho = 1{,}26\cdot10^3$ кг/м^3), водный раствор глицерина ($\nu = 10^{-4}$ м^2/с; $\rho = 1{,}23\cdot10^3$ кг/м^3), Л3-ТК-2 при $t = +20$ °С ($\nu = 0{,}7\cdot10^{-6}$ м^2/с; $\rho = 691$ кг/м^3) и при –100 °С ($\nu = 1{,}55\cdot10^{-5}$ м^2/с; $\rho = 784$ кг/м^3).

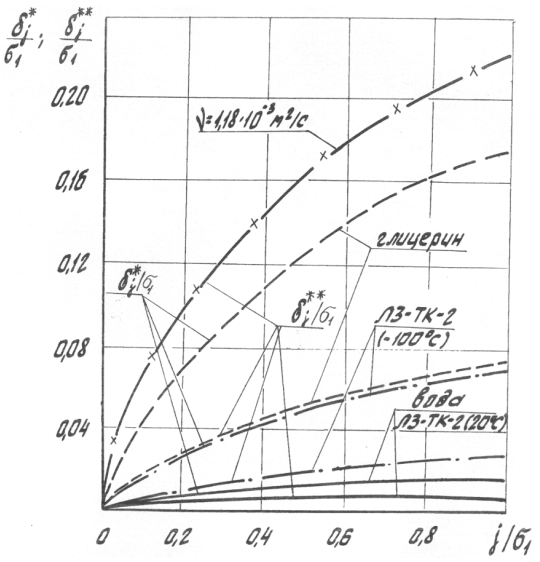


Рис. 4. Изменение параметров пограничного слоя вдоль рабочей решетки профилей по входной кромке лопатки

Из графиков видна существенная зависимость роста δ_1^* и δ_1^{**} с увеличением вязкости рабочей среды. Так, при течении глицерина на кромке лопатки величина толщины вытеснения δ_1^{**} составила 22,5 % от длины входной кромки σ_1. При этом от носика входной кромки значение δ_1^* вначале резко возрастает, достигая для всех рабочих жидкостей на половине длины кромки 75 % своего конечного значения.

Следует отметить, что проведенный анализ и расчеты параметров пограничного слоя в каналах РК МН проводились на основе приближенного решения уравнений пограничного слоя, предложенного К. Польгаузеном [3]. Обтекание входной кромки лопатки рабочей решетки профилей принималось эквивалентно обтеканию потоком вязкой жидкости окрестности передней критической точки клина с углом раскрытия γ. При анализе пограничных слоев на каждой из поверхностей канала решетки РК пренебрегалось эффектами, связанными с течением в углах. Такое допущение при течении в геометрически диффузорном канале общепринято [2] и позволяет моделировать реальную ситуацию с достаточной точностью.

Очевидно, что качество приближенного расчета будет зависеть от степени точности выбранного распределения профиля скоростей:

$$\frac{W}{W_K} = f\left(\frac{z}{\delta(z)}\right) = f(\eta), \qquad (18)$$

где $\eta = \dfrac{z}{\delta(z)}$ – безразмерное расстояние от стенки, полученное делением размерной величины расстояния z по нормали от тела на толщину пограничного слоя $\delta(z)$. Сама функция $f(\eta)$ зависит только от η, чем выражается предположение об аффинности профилей скоростей [3].

Приближенный метод расчета параметров пограничного слоя в решетке профилей лопаток центробежной гидромашины имеет допущения, связанные, в частности, с расчетом не каждой отдельной струйки потока, а решения дифференциальных уравнений пограничного слоя только по средним его параметрам. Приемлемость подобного приема можно проверить, выполнив для сравнения (точные) автомодельные решения уравнений пограничного слоя. Известно, что рассмотренные классы течения имеют аффинноподобные профили скоростей, что позволяет выполнить точные решения уравнений пограничного слоя, так называемые автомодельные решения. Точное решение задачи осесимметричного течения для рассматриваемого случая обтекания клина в решетке профилей выполнил Д. Хартри. В работе [1] при анализе течения около передней точки клиновидного тела для двух значений $\gamma = 0$; ($m = 0$) и $\gamma = 36°$, ($m = 0{,}11$) (см. формулу (4)) показано практическое совпадение профилей скорости, полученных при точном и приближенных решениях. Полученные решения позволяют с достаточной точностью определить силы трения и гидравлические качества РК ЦБН с учетом реальной гидродинамической картины течений потока вязкой жидкости в решетке профилей лопаток центробежной гидромашины.

Библиографические ссылки

1. Петров В. И., Чебаевский В. Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М. : Машиностроение, 1982.

2. Высокооборотные лопаточные насосы / Б. И. Боровский, Н. С. Ершов, Б. В., Овсянников и др. ; под ред. Б. В. Овсянникова, В. Ф. Чебаевского. М. : Машиностроение, 1975.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969.

4. Краева Е. М. Теоретический анализ обтекания решетки профилей малорасходных центробежных насосов потоком вязкой жидкости // Вестник СибГАУ. Вып. 1(27). 2010. С. 96–99.

E. M. Kraeva

HYDRODYNAMICS OF VISCOUS FLUID FLOWS IN THE LATTICE OF PROFILES BLADES OF CENTRIFUGAL HYDRAULIC MACHINE

The calculation of a viscous fluid flow profile cascade vanes of a centrifugal impeller is represented. The dependencies of parameters of the boundary layer along the edges of the input grating blade centrifugal hydraulic profiles are obtained. The calculations for a number of working viscosities.

Keywords: hydrodynamics flow, model, turbulence, parameters, flow, viscosity, working lattice, blade.

© Краева Е. М., 2011

УДК 621.396.677

А. С. Першин, Е. Ю. Узолин

АДАПТИВНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ ОАО «ИСС»

Приведен один из вариантов исполнения адаптивной антенны, позволяющий эффективно подавлять помеху с заданного направления при сохранении уровня сигнала в большей части зоны обслуживания.

Ключевые слова: космический аппарат, адаптивные многолучевые антенны, кластер.

Развитие современных антенных систем, в том числе военной связи, потребовало обеспечения высокой помехозащищенности антенной системы от направленных помех. При использовании классических многолучевых антенн (МЛА), где схема антенно-фидерной системы (АФС) построена по принципу «облучатель–луч», защита от помехи осуществляется отключением приемника для заданного луча. Однако, это также лишало связи или приводило к значительному ухудшению качества связи тех, кто находился в зоне отключения сигнала [1].

Решением данной проблемы стало развитие адаптивных антенных систем. Принципиальное отличие данных систем заключается в том, что они позволяют подавлять помеху в определенной зоне, но при этом, не ухудшают качество связи для остальных абонентов. Несмотря на то, что адаптивные антенные системы используют антенны различных типов, их можно разделить на 3 основных класса:

– адаптивная фазированная антенная решетка (АФАР);

– адаптивная многолучевая антенна (АМЛА);

– их вариации.

Одно из направлений использования таких антенн – это установка их на космические аппараты (КА). В нашей стране использование адаптивных антенн на КА – это только перспектива. Преимуществом АМЛА над АФАР является возможность обеспечить покрытие всей зоны обслуживания (ЗО) набором узких высокоэнергетических лучей, обеспечивающим высокое качество связи, а при возникновении помех эффективно подавлять помеху. Кроме того, подавление сигнала в АМЛА осуществляется в главном лепестке диаграммы направленности антенны.

В данной статье будет рассмотрен один из примеров реализации АМЛА и представлены возможности подавления направленных помех в заданной зоне. Данная адаптивная антенная система должна обеспечивать работу в двух режимах:

– многолучевой режим;

– режим подавления.

Данные режимы при их совмещении могут существенно дополнять друг друга. Так, в мирное время наиболее предпочтительной является многолучевая концепция, позволяющая организовывать связь с абонентами во всей зоне обслуживания вплоть до глобальной. Кроме того, существует возможность двойного использования данного режима (в мирное время) выделяя часть ресурса для средств гражданской связи. При этом для части ячеек облучателя МЛА, которые не требуют противопомеховой защиты, спутниковая обработка сигналов может быть отключена, что позволит использовать коммерческие пользовательские терминалы [2]. На рис. 1 приведен габаритный эскиз адаптивной многолучевой антенны, работающей в Ка-диапазоне частот.

АМЛА Ка-диапазона (диаметр рефлектора $D = 400$ мм, фокусное расстояние $F = 985$ мм), имея в своем составе 61-элементную облучающую решетку, по схеме «излучатель–луч» формирует 61 луч шириной 1°×1°, набор которых покрывает зону 5°×5°. Блок формирования диаграммы направленностей (ДН) позволяет формировать провалы в ДН для обеспечения подавления помехи. Блок формирует кластер, состоящий из определенного количества рупоров, от 7 до 37 облучателей. Каждый элемент запитывается синфазно и равноамплитудно.

При отсутствии помехи антенна работает в режиме МЛА по схеме «облучатель–луч». При появлении помехи формируется кластер, состоящий из 7–19 элементов для подавления помехи. Для облучателя, на котором наблюдается превышение уровня «сигнал/шум», система формирует варианты подавления сигнала в пределах луча методом перебора вариантов. Для случая с одной помехой система использует заранее

синтезированные варианты амплитудно-фазового распределения (АФР). Для случая нескольких помех система формирует еще один кластер для подавления помехи либо подавляет две помехи одним кластером, синтезируя АФР для подавления двух помех одновременно.

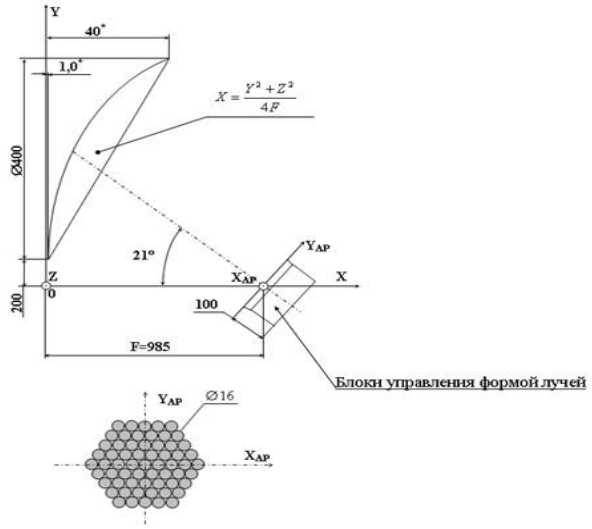


Рис. 1. Габаритный эскиз АМЛА Ка-диапазона

Кластер, состоящий из 19 элементов, позволяет получить гораздо больше вариантов формирования провала, а также изменения его положения, чем кластер, состоящий из семи элементов. Провалы, формируемые 19-элементным кластером, можно получить различной формы для покрытия заданной ЗО.

Для формирования провалов на краях зоны необходимо увеличить количество облучателей решетки [3]. Набор из 31 облучателя, который покрывает зону 5°×5° одноградусными лучами, не позволяет сформировать провалы на краях ЗО.

Как показали результаты моделирования, для подавления сигнала на краю ЗО на 25 дБ и больше необходимо, чтобы антенна формировала набор узких лучей 0,5°×0,5° либо 1°×1°, для более широких лучей качество подавления сигнала ухудшается.

Результаты расчетов радиотехнических характеристик АМЛА. Были проведены расчеты радиотехнических характеристик АМЛА с набором кластеров для подавления помех на краях зоны обслуживания. Как видно из результатов расчета, подавление помехи возможно в небольшой зоне 0,1° × 0,1° на –30 дБ (рис. 2, 3).

При изменении АФР облучающей решетки возможно перемещение провала в ДН АМЛА в пределах ЗО с различной глубиной провала.

Алгоритм обладает хорошим быстродействием, что позволит оперативно подавлять помеху в пределах ЗО (синтез АФР до 2 минут). Как показывают расчеты, подавление помехи на 30 дБ достигается без существенного искажения ДН антенны, что позволит сохранить уровень сигнала для всей ЗО.

Как показали результаты моделирования, представленная в данной статье система позволяет формировать провалы в ДН на 25–30 дБ для подавления направленных помех.

Перспективой развития технологии адаптивных антенн является:

– использование в Ка-диапазоне;

– использование цифровой ДОС в составе АФУ антенны;

– использование кодирования сигналов и их корреляционной обработки сигналов для выявления помех и формирования провалов в ДН для их подавления;

– возможность подавления помех в заданной зоне на 25–30 дБ.

По результатам расчетов было показано, что в Ка-диапазоне возможно подавление помех на 25–27 дБ в небольших зонах. Рассчитанные антенны имеют малые габариты и массовые показатели (апертуры рефлекторов не более 500 мм).

Библиографические ссылки

1. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ : в 2 ч. Ч. 1. М. : Изд-во «Связь», 1977.

2. Richard C. Johnson Antenna Engineering Handbook. 3ed. Johnson, 1983.

3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ : в 2 ч. Ч. 2. М. : Изд-во «Связь», 1977.

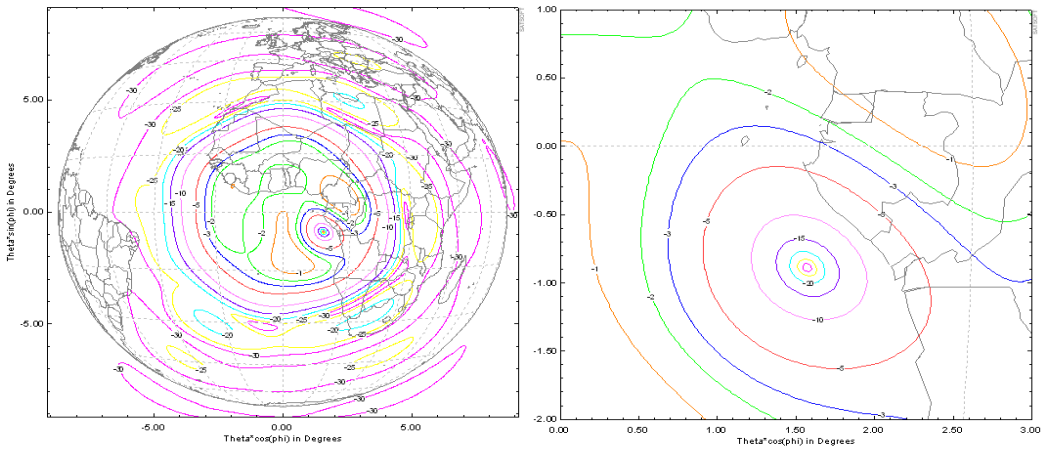


Рис. 2. Проекция ДН на заданную ЗО. Кластер состоит из 19 элементов (1–19 рупор). Контуры построены от –3 до –30 дБ. Провал по уровню 30 дБ в зоне 0,1°×0,1°. Слева – общий вид ДН, справа – провал в ДН

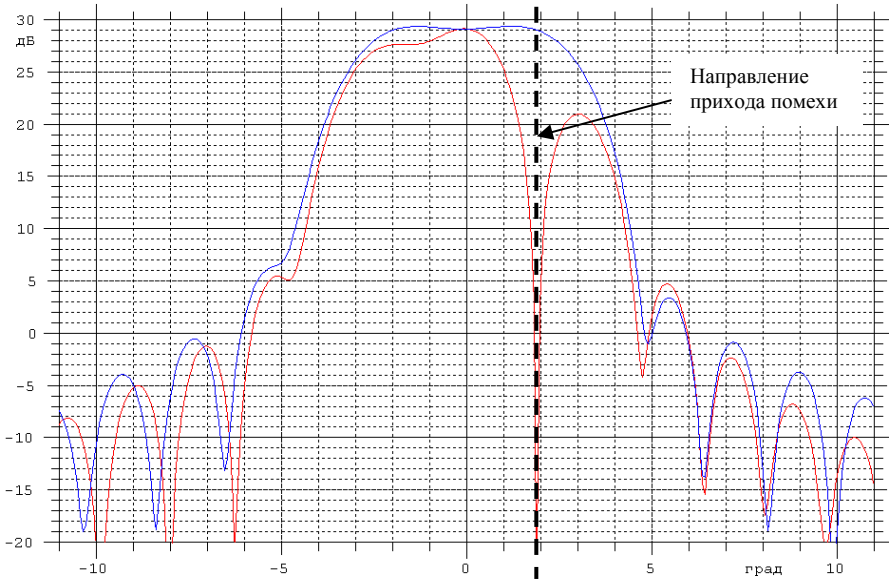


Рис. 3. ДН антенны до и после подавления сигнала в кластере

A. S. Pershin, E. Yu. Uzolin

ADAPTIVE MULTI BEAM ANTENNA JSC «ISS»

The article presents one of the embodiments of adaptive antennas, allowing effectively suppress interference in a given direction, while maintaining the basic signal.

Keywords: spacecraft, adaptive multi beam antenna, cluster.

© Першин А. С., Узолин Е. Ю., 2011

УДК 629.7.023.001

В. Б. Сапожников, Я. П. Гришко, А. В. Корольков, В. А. Большаков, Ю. М. Новиков,
С. Б. Константинов, М. Б. Мартынов

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРИСТО-СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ ВНУТРИБАКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ВЕРХНИХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И РАЗГОННЫХ БЛОКОВ

Приводится теоретическое и экспериментальное обоснование перспективности применения материалов нового типа – комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ) в конструкции внутрибаковых устройств (ВБУ) двигательных установок с целью обеспечения многократного запуска ЖРД космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков в условиях практической невесомости. Показано, что работа КПСМ сопровождается явлениями, отсутствующими при использовании ранее применявшихся для этой цели сетчатых материалов. В результате, эффективность ВБУ на основе КПСМ существенно возрастает, что, в конечном итоге, позволяет свести до минимума невырабатываемые остатки топлива в баках и, тем самым, повысить энергомассовую эффективность летательных аппаратов в целом.

Ключевые слова: жидкостной ракетный двигатель, многократный запуск, условия практической невесомости, внутрибаковые устройства.

Одной из проблем, появившихся одновременно с началом практического освоения космического пространства в конце 50-х годов прошлого столетия, стала проблема обеспечения многократного запуска ЖРД космических летательных аппаратов (КЛА) в условиях, близких к невесомости. К настоящему времени разработаны многочисленные технические устройства и способы для решения этой проблемы, начиная от применения разделительных диафрагм в топливных баках (ТБ) и заканчивая использованием акустиче-

ских либо электромагнитных полей для управления положением поверхности раздела «жидкость–газ» при невесомости.

Однако наибольшее распространение при объемах ТБ, превышающих сотни литров, получили внутрибаковые устройства (ВБУ) на основе так называемых сетчатых разделителей (СР) [1]. Принцип работы этих устройств заключается в том, что для предотвращения прорыва газа наддува в расходные магистрали ТБ при запуске ЖРД в невесомости используются силы поверхностного натяжения (капиллярные силы), величина которых тем больше, чем меньше характерный размер ячеек СР.

Главными недостатками таких устройств при относительно малом гидравлическом сопротивлении СР являются нестабильность их параметров в процессе работы, технологические проблемы крепления СР в корпусные элементы ВБУ, необходимость наличия опорных каркасов для СР. Кроме того, если газ наддува все-таки проходит через СР, эти устройства перестают работать.

В 1990-х годах коллективом сотрудников НИИ ЭМ МГТУ им. Баумана (в кооперации) было предложено использовать в качестве конструкционного материала ВБУ новый вид проницаемых структур – комбинированные пористо-сетчатые металлы (материалы) (КПСМ) [2]. Эти материалы значительно расширили область применения пористых сетчатых металлов (ПСМ), являющихся одним из значительных достижений в области тепломассообмена научной школы доктора технических наук, профессора В. М. Поляева.

В настоящее время КПСМ планируется широко применять в качестве элементов ВБУ, так как их свойства в этом качестве заметно превосходят характеристики обычных СР.

Основным отличием СР на основе КПСМ от обычных СР является объемная (трехмерная) структура пор. Иначе говоря, СР на основе КПСМ имеют пористую структуру не только в нормальном, но и в тангенциальном (касательном) направлении к поверхности СР. Такая особенность КПСМ обусловливает физическое явление, отсутствующее у обычных двумерных СР. Суть этого явления, которое мы определили как «саморегенерацию», заключается в следующем.

Для двумерных (мы условно будем называть их плоскими) СР работоспособность ВБУ на их основе, которые в дальнейшем будем обозначать как капиллярные заборные устройства (КЗУ), определяется условием:

$$\Delta p_{\text{кап}} \geq \Delta p_{м} . \qquad (1)$$

где $\Delta p_{\text{кап}} = \dfrac{4\sigma}{d_{э}}$ – капиллярная удерживающая способность (КУС) КЗУ; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость–газ»; $d_{э}$ – эквивалентный диаметр ячейки СР.

Тогда найдем, потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности СР:

$$\Delta p_{м} = \zeta_{м} \frac{\rho \cdot u^2}{2} ,$$

где $\zeta_{м}$ – коэффициент гидравлического сопротивления СР; ρ – плотность жидкости; u – скорость потока по нормали к поверхности СР.

В общем случае величина примет вид

$$\zeta_{м} = E + F \cdot \mathrm{Re}^{m} ,$$

где $\mathrm{Re} = \dfrac{u \cdot d_{э}}{\nu}$ – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость жидкости. Коэффициенты E, F и m определяются экспериментально путем проливок образцов СР.

В том случае, если условие (1) не выполняется, газ наддува проникает через СР, а давление во внутренней полости КЗУ (в так называемом «заневоленном» объеме) и снаружи выравнивается. В результате жидкость, находящаяся во внутренней полости КЗУ, перестает удерживаться в «заневоленном» объеме и КЗУ теряет работоспособность.

Для КЗУ, использующих СР на основе КПСМ, условие (1) также является условием, определяющим их работоспособность. Однако при нарушении условия (1) в СР на основе КПСМ жидкость, находящаяся в контакте с поверхностью КПСМ, за счет трехмерной структуры пор КПСМ под действием сил поверхностного натяжения начинает перемещаться в тангенциальном направлении. В результате участок КПСМ, на котором произошел прорыв газа во внутреннюю полость КЗУ, вновь восстанавливает работоспособность, и отбор жидкости в расходную магистраль топливного бака продолжается.

Указанная особенность КЗУ на основе КПСМ делает их весьма перспективными для применения в качестве ВБУ, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета.

Для оценки эффективности работы таких ВБУ нами была разработана математическая модель процесса функционирования элемента КЗУ, представляющего собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ (рис. 1).

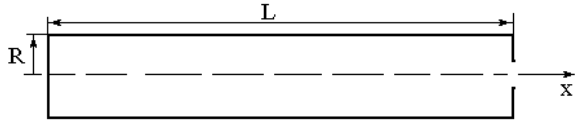


Рис. 1. Расчетная схема и обозначения:
L – длина трубы; R – радиус трубы; r – радиус выходного отверстия; λ – коэффициент сопротивления; α – «степень сухости» трубы в данном сечении

Допущения. Жидкость несжимаемая. Течение в трубе одномерное, вязкое с распределенным источ-

ником. На внешней поверхности сетки заданное давление (давление наддува), а на срезе выходного отверстия давление равно 0.

Уравнение движения имеет вид

$$u \cdot \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} - \lambda \cdot \frac{u^2}{4 \cdot R} \cdot \mathrm{sgn}(u). \qquad (2)$$

Уравнение неразрывности выглядит следующим образом:

$$\frac{du}{dx} = (1-\alpha)\frac{2}{R} \cdot V_{set}(p_{izb} - p(x)), \qquad (3)$$

где $V_{set}(p)$ – функция зависимости скорости протекания жидкости сквозь сетку от перепада давления:

$$V_{set}(\Delta p) = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot a \cdot \Delta p}}{2 \cdot a},$$

где $a = \frac{E \cdot \rho}{2}$, $b = \frac{F \cdot \nu \cdot \rho}{2 \cdot d_э}$, $E, F, d_э$ – характеристики сетки.

Условия однозначности: при $x = 0, \quad u = 0;$ при $x = L, \quad p = 0$.

Для учета сужения канала у выхода из трубы, давление на выходе пересчитывается:

$$p = \rho \cdot u_{x=L}^2 \cdot \left(\left(\frac{R}{r} \right)^2 - 1 \right).$$

Конечно-разностные аналоги уравнений решаются методом «пристрелки» до установления требуемого распределения давлений. Полученное установившееся распределение давлений и скоростей считается неизменным заданный период времени *dt*. Текущее состояние (объем отобранной жидкости и уровень заполнения емкости) определяется из начального (заданного) состояния численным интегрированием по времени полного расхода жидкости через заборное устройство методом прямоугольников с фиксированным шагом *dt*.

Вычислительный эксперимент проводился в условиях точного выполнения балансных соотношений и полной повторяемости.

Для учета перехода модельного элемента КЗУ в режим «саморегенерации» в процессе счета проверялся максимальный перепад давления на стенках. Как только он достигал критического значения $\Delta p_{крит} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_э}$, алгоритм переводился в режим «подсоса» газа с последующим восстановлением работоспособности КЗУ.

В режиме «подсоса» на выходе из трубы фиксировались давление и объем откачиваемой смеси. Количество отобранной жидкости определялось из геометрических соображений по текущему положению поверхности внутри трубы.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному процессу была проведена серия физических экспериментов на модельной экспериментальной установке с использованием башни (стенда) невесомости.

В состав стенда входит испытательный контейнер (рис. 2). Контейнер представляет собой пространственную ферменную конструкцию в виде параллелепипеда, изготовленную из труб и уголков из алюминиевого сплава.

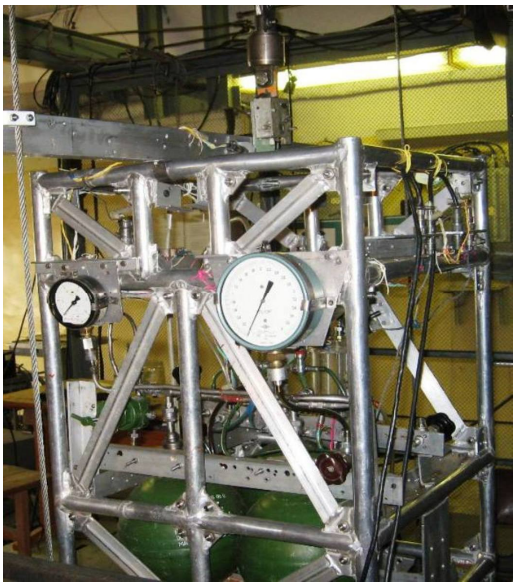


Рис. 2. Общий вид испытательного контейнера

В центре верхней стенки контейнера закреплён бомбовый электрозамок для осуществления сброса контейнера.

Положение контейнера при проведении эксперимента (в «полёте») стабилизируется при помощи двух направляющих тросов.

Основной составной частью испытательного контейнера является модель фрагмента топливного бака (далее – модель), представляющая собой изготовленное из оргстекла полушарие, герметично закрытое сверху плоской крышкой из оргстекла.

Внутри модели бака смонтирована модель элемента КЗУ. На сливном патрубке модели установлен датчик сплошности, состоящий из осветителя и светодиода. Рядом с датчиком сплошности установлен патрубок для подключения датчика перепада давления на КЗУ.

В верхней части модели имеется патрубок для подсоединения пневмомагистрали, через которую осуществляется наддув, обеспечивающий вытеснение жидкости из модели при проведении эксперимента. Там же установлен дренажный кран для сброса давления при заправке модели рабочей (модельной) жидкостью.

Модель топливного бака соединёна трубопроводом с приёмной ёмкостью. Перед проведением эксперимента приёмная ёмкость заправляется рабочей жидкостью, которая затем перекачивается в модель бака. В ходе проведения эксперимента в приёмную ёмкость переливается рабочая жидкость из модели бака. В магистрали, соединяющей сливной патрубок

модели бака с приёмной ёмкостью, установлен электроклапан, который при проведении эксперимента открывается по сигналу от блока автоматики.

В состав пневмогидравлической системы стенда (рис. 3) входят два шаровых баллона для сжатого воздуха суммарной ёмкостью 16 литров, шаровый баллон – ресивер ёмкостью 8 литров, редуктор, электроклапан, два манометра, пневмо- и гидромагистрали, 6 запорных вентилей. Для измерения давления наддува и перепада давления на сетке внутрибакового заборного устройства на стенде установлены датчики давления типа МДДФ-9. Перегрузка при проведении эксперимента измеряется акселерометром типа МП-15.

В ходе проведения эксперимента регистрируются следующие параметры:

– момент сброса контейнера;

– момент включения электроклапана;

– давление наддува в модели бака;

– перепад давления на сетке внутрибакового заборного устройства;

– момент прорыва газа через сливной патрубок модели;

– количество рабочей жидкости, слитой из модели бака в приёмную ёмкость;

– величина перегрузки.

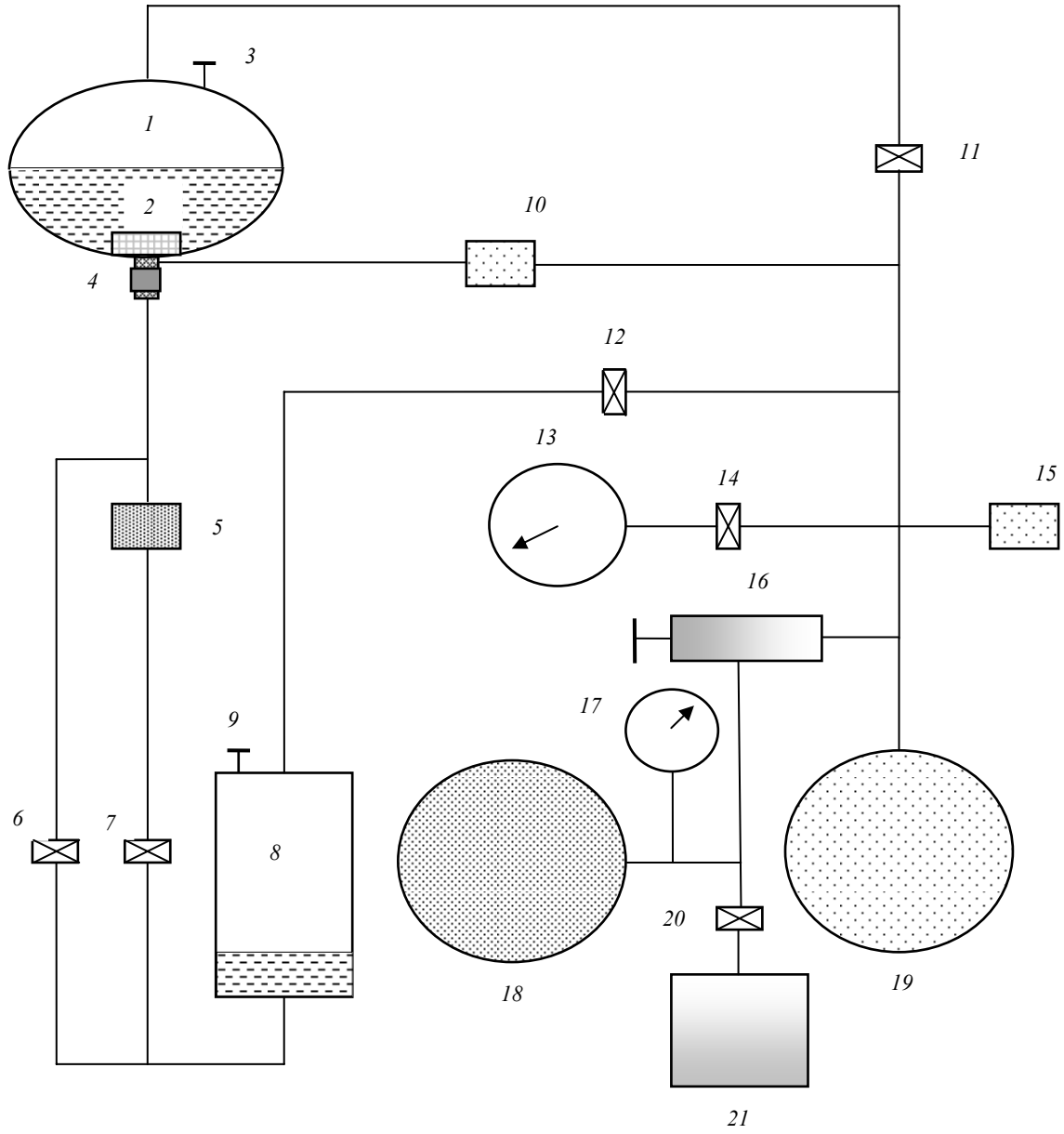


Рис. 3. Пневмогидравлическая схема экспериментальной установки:
1 – модель фрагмента бака; *2* – модель элемента КЗУ; *3* – дренажный кран; *4* – датчик сплошности; *5* – электроклапан; *6* – вентиль заправки; *7* – вентиль слива; *8* – сливная ёмкость; *9* – дренажный кран; *10* – датчик перепада давления; *11* – вентиль наддува; *12* – вентиль перекачки; *13* – образцовый манометр; *14*, *20* – запорный вентиль; *15* – датчик давления; *16* – редуктор; *17* – манометр; *18*, *19* – ресивер; *21* – компрессор

Для регистрации перечисленных параметров используется светолучевой осциллограф типа Н-115.

По результатам расшифровки осциллограммы определяется момент прорыва газа, подсчитывается объём слитой жидкости и остаток жидкости в модели на момент прорыва.

После прорыва газа во внутреннюю полость КЗУ начинается работа элемента КЗУ в режиме «саморегенерации». Перепад давления на стенке после прорыва газа вновь начинает расти, и отбор жидкости продолжается.

Отбор жидкости в вычислительном и физическом экспериментах осуществлялся до момента исчезновения контакта сетчатого устройства с жидкостью. Всего было выполнено 35 серий экспериментов с различными модельными жидкостями (хладон-113, хладон-114, спирт этиловый 96 %, водный раствор этилового спирта 40 %, вода дистиллированная). На рис. 4 в качестве примера показаны зависимости объема отобранной жидкости от времени для 33, 34 и 35 серий экспериментов. Точками указаны объемы отобранной жидкости в момент «прорыва» газа в эксперименте.

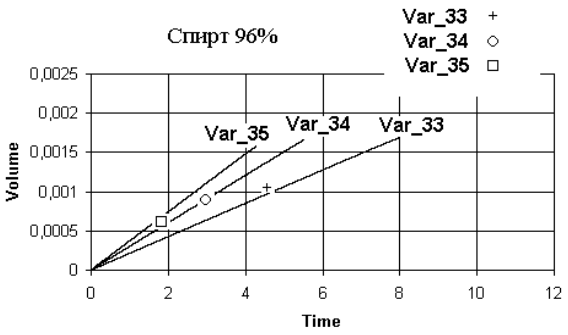


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные данные по работе КПСМ в режиме сепарации газожидкостной смеси, наддув $(0{,}1; 0{,}2; 0{,}3)\cdot 10^5$ Па

Можно отметить хорошее совпадение результатов расчета практически для всех вариантов, реализованных в физических экспериментах, до момента «прорыва» газа.

На рис. 5 показано, как меняются объемы жидкости и газа, отбираемые с помощью модельного элемента КЗУ при его работе в режиме «саморегенерации», для одного из рассмотренных вариантов. Здель видно, что даже после того, как газ наддува прорывается во внутреннюю полость модельного КЗУ, процесс обора жидкости не прекращается.

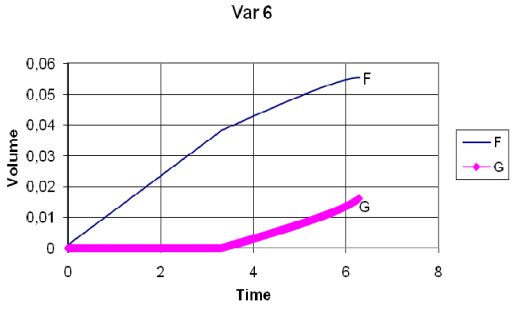


Рис. 5. Изменение количества отобранных жидкости (F) и газа (G) по времени при работе модельного элемента КЗУ в режиме «саморегенерации»

Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность работы КЗУ с применением СР на основе КПСМ и перспективность их использования для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета.

Библиографические ссылки

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев и др. ; под ред. В. М. Поляева. М. : УНПЦ «Энергомаш», 1997.

2. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников [и др.]. М. : Металлургия, 1983.

V. B. Sapozhnikov, Ya. P. Grischko, A. V. Korolkov, V. A. Bolshakov, Yu. M. Novikov, S. B. Konstantinov, M. B. Martynov

APPLICATION OF COMBINED POROUS-MESH MATERIALS IN CONSTRUCTION OF INTRATANK DEVICES OF PROPULISION INSTALLATIONS OF SPACECRAFTS, FINAL STEPS OF CARRIER ROCKETS AND UPPER-STAGES

Theoretical and experimental basis of perspective of application of new type materials – the combined porous-mesh materials (KPSM) in intratank devices (VBU) of propulsion installations to provide multiple starts of liquid-propellant engine of spacecrafts, final steps of carrier rockets and upper-stage of rockets in the conditions of real zero-gravity is described in the report. It is shown that KPSM work is accompanied with phenomena that do not appear while using meshy materials previously applied for this purpose. As a result the VBU efficiency on the base of KPSM increases greatly and finally it allows to cut to minimum unusable fuel in tanks and to raise power mass efficiency of aircraft in general.

Keywords: liquid-propellant engine, multiple starts, conditions of real zero-gravity, intratank devices.

© Сапожников В. Б., Гришко Я. П., Корольков А. В., Большаков В. А., Новиков Ю. М., Константинов С. Б., Мартынов М. Б., 2011

УДК 528.852.8

А. В. Ходяев, А. П. Шевырногов, А. В. Картушинский

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОД МИРОВОГО ОКЕАНА

Рассмотрена созданная в Институте биофизики СО РАН технология последовательной тематической обработки спутниковых данных, представленных изображениями концентрации фитопигментов в поверхностном слое океана и температуры поверхности океана. Приводится анализ проблем разработки программного обеспечения тематической обработки спутниковых данных. Дается краткое описание этапа предварительной обработки данных. В качестве исходных данных использовались снимки, полученные со спутниковой аппаратуры SeaWiFS, MODIS и NOAA.

Ключевые слова: цветовая характеристика океана, обработка спутниковых данных, экологический мониторинг Мирового океана.

В настоящее время ощущается высокая потребность в создании систем пространственно-временного мониторинга экосистем Мирового океана на базе интеграции существующих потоков информации. Остро стоит вопрос эффективного хранения и обеспечения доступа к архивам данных дистанционного зондирования Земли [1; 2]. Такая проблема решается путем разработки эффективной архитектуры системы хранения спутниковых данных, автоматизирующей процессы поиска требуемой информации [3].

Возможность автоматизации процесса доступа к разнородной информации, ее анализа и принятия решений позволит повысить эффективность управления и использования данных дистанционного зондирования в процессах мониторинга экосистем Мирового океана.

Общие требования к информационным системам тематической обработки спутниковых данных. Одной из основных задач обработки данных является картирование местоположения границ изменения изучаемого параметра (например, температура поверхности или концентрация хлорофилла). Для этого необходимы методы поиска подобных границ и их выделения.

Необходима возможность получения композитов различных временных масштабов, а также возможность отслеживания изменений на различных областях изображений.

Ввиду наличия множества спутниковых миссий необходим инструмент, который дает возможность объединять временные серии, полученные от различных космических аппаратов.

Требуются инструменты, позволяющие изучать пространственно-временные характеристики рядов данных. Такие инструменты должны включать в себя декомпозицию временных рядов, пространственно-временное профилирование, построение градиентных полей.

Необходима система хранения спутниковых данных, играющая роль не только хранилища, но и системы, способной оперативно извлекать требуемые данные и эффективно распределять процессорное время. Такая система должна быть включена в единое информационное пространство совместно с системой статистической обработки данных.

Как правило, программное обеспечение обработки спутниковых данных реализует технологию, представленную на рис. 1.

В качестве примера на этапе предварительной обработки применяются отдельные программы для выделения интересующих областей на изображении, создания растровых изображений, построения композитов и восстановления пропущенных значений.

После этапа предварительной обработки используются программы для расчета градиентных полей и статистической обработки данных.

Каждая отдельная задача реализуется в своем отдельном модуле. Исходные данные, а также данные обработки не объединены общей системой хранения. Часто результаты обработки одного модуля или программы трудно совместимы с входными данными других модулей или программ.

В итоге у исследователя накапливается некоторое количество программных продуктов, выполняющих по отдельности необходимые задачи, но не представляющих единой системы обработки спутниковой информации.

Спутниковые данные представляют собой двоичные файлы, размеры которых достигают десятки и сотни мегабайт. Если происходит обработка данных за годовой промежуток, то при наличии ежедневной съемки обсчитываются порядка 360 снимков. При размерах каждого снимка 4096 × 2048 пикселей количество итераций может составлять более 3 млрд. А при обработке сразу нескольких спектральных каналов это число увеличивается в разы.

При подобных объемных вычислениях становится актуальной задача оптимального хранения файлов данных с целью их эффективного поиска и использования [4–6]. На сегодняшний день основным остается механизм, когда файл данных в исходном виде находится под управлением файловой системы и используется непосредственно во время выполнения расчетов. Даже если файлы находятся под управлением системы управления базами данных, то хранятся они как массивы двоичных данных и не подвергаются какой-либо обработке внутри самой базы данных [7; 8]. По мере необходимости подобные массивы данных извлекаются из базы данных, преобразуются в исходный формат и используются как обычные файлы [9].

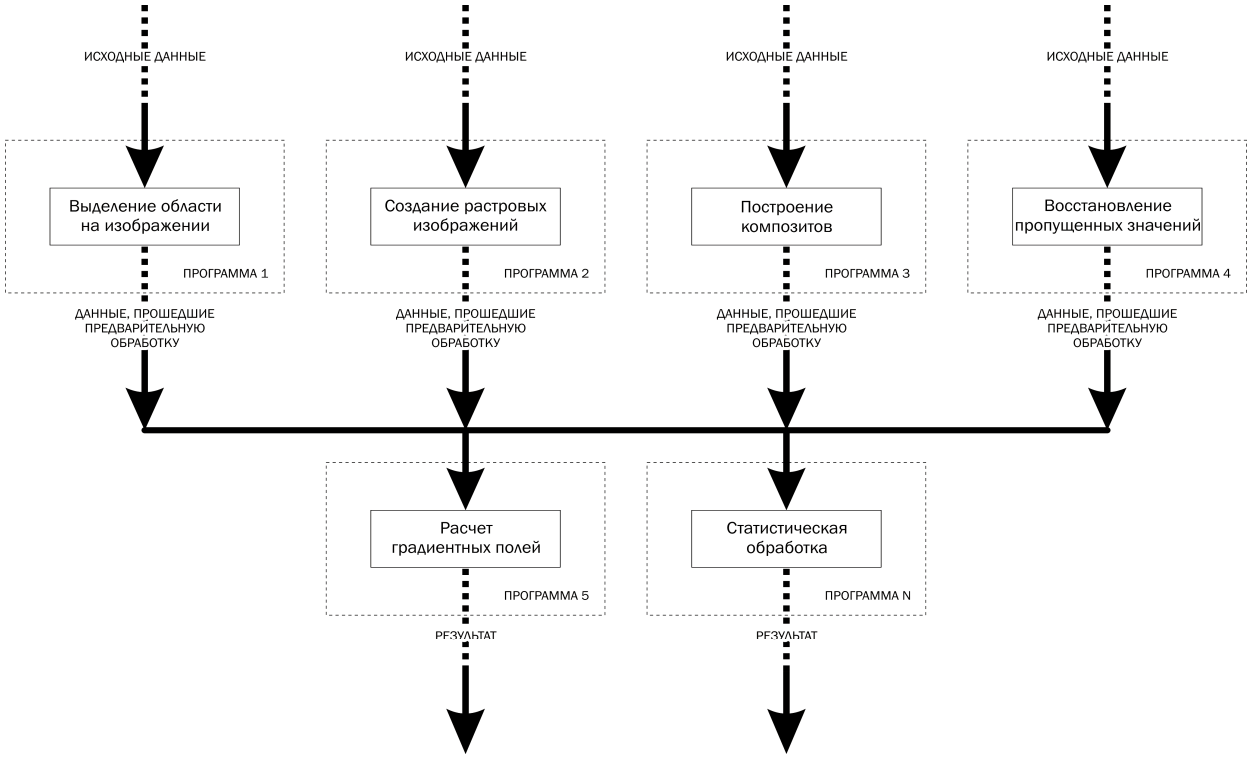


Рис. 1. Пример технологии обработки спутниковых данных

Технология предварительной обработки спутниковых данных. Предлагается следующая оригинальная технология последовательной тематической обработки спутниковых данных (рис. 2).

Логически можно выделить три этапа тематической обработки данных, выполняемых друг за другом. Это предварительная обработка, собственно тематическая обработка и подготовка данных к выводу. Все этапы осуществляются в рамках единого информационного пространства. Также в это информационное пространство включена система хранения исходных данных и результатов обработки каждого из этапов.

Входные данные в исходном виде помещаются в систему хранения. После проведения предварительной обработки результаты обработки помещаются в систему хранения. Тематическая обработка проводится с использованием данных, прошедших предварительную обработку, а также, при необходимости, с использованием исходных данных. Результаты тематической обработки помещаются в систему хранения. Этап подготовки информации к выводу осуществляется на основе данных тематической обработки. Хранение результатов обработки на каждом этапе позволяет повторно выполнять необходимые расчеты, избегая предыдущих вычислений. Наличие общего информационного пространства позволяет на каждом этапе работы системы использовать общие вспомогательные процедуры и функции.

Рассмотрим более подробно этап предварительной обработки.

Предлагаются следующие этапы предварительной обработки данных.

1. При наличии в исходных данных пространственных ошибок необходимо провести процедуру выявления файлов с ошибками и устранить их.

К таким ошибкам могут относиться, например, неверное позиционирование снимаемой сцены. Снимаемая сцена некоторых спутниковых снимков может начинаться с различных значений широты и долготы, что при групповой обработке приводит к неверной интерпретации данных и резко снижает достоверность расчетов. Смещение изображения хотя бы на 100 пикселей при пространственном разрешении снимка 16 × 16 км составляет 1600 км на местности.

Разработанный авторами механизм выявления ошибок подобного рода основан на выявлении рядов с высоким значением дисперсии. На исходной сцене случайным образом выбираются несколько точек, строится временной ряд из значений параметра в каждой точке, и происходит расчет дисперсии. Файлы, значения точек которых имели высокие значения дисперсии, предлагаются пользователю для дальнейшего устранения ошибок. Метод устранения пространственного смещения представлен на рис. 3.

Исправление смещения работает в двух режимах:

– в автоматическом, при котором система начинает сдвигать всю сцену на один пиксель по широте или долготе. При этом продолжается сравнение значений дисперсии в ранее выбранных точках. Направление сдвига задается заранее пользователем. Сдвиг прекращается до тех пор, пока из временного ряда не исчезнут точки с высоким значением дисперсии;

– ручном режиме, при котором пользователь задает конечное положение сцены, указав количество пикселей по горизонтали и вертикали, на которое нужно сдвинуть ошибочно позиционированную сцену.

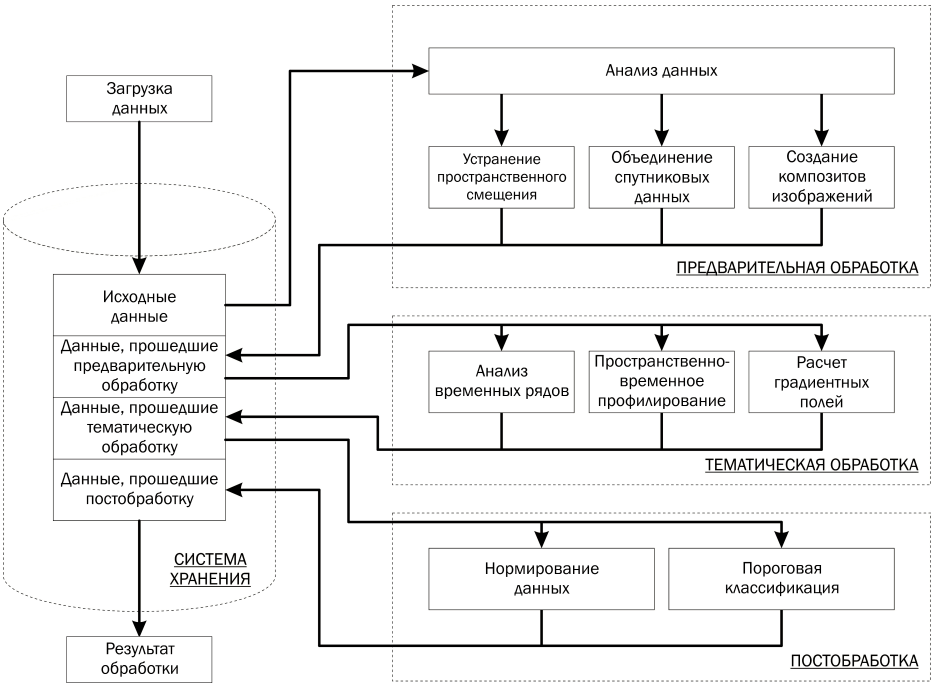


Рис. 2. Технологическая схема функционирования

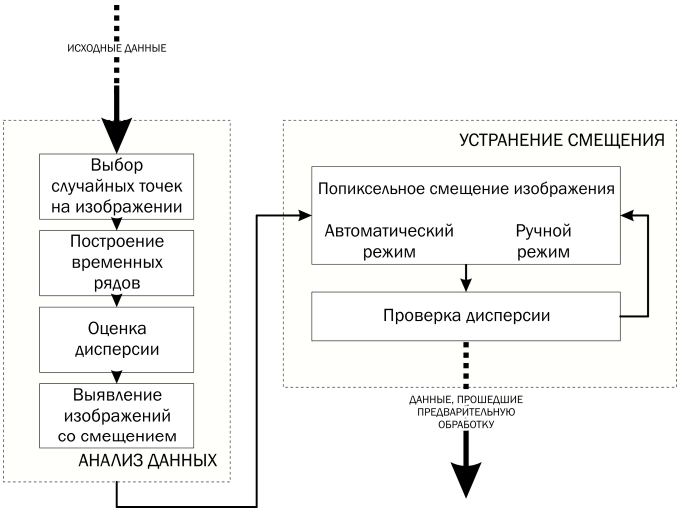


Рис. 3. Устранение пространственного смещения

2. Для объединения временных серий изображений различных спутников предложен метод, сочетающий в себе широко известные алгоритмы интерполяции (билинейная, бикубическая интерполяция).

Проблема объединения серий особенно остро стоит при исследовании глобальных процессов в океане, где крайне важен большой временной ряд наблюдений. Необходимо, чтобы временная серия не имела пропусков, либо количество этих пропусков было сведено к минимуму.

Основной проблемой при разработке такого механизма является проблема пространственного разрешения исходных данных. Как правило, объединяемые спутниковые изображения имеют различное пространственное разрешение. Возможны два варианта объединения данных:

– с приведением к единому пространственному разрешению;

– без приведения к единому пространственному разрешению.

В первом случае за единое пространственное разрешение выбирается меньшее из имеющихся снимков, требующих объединения. Далее изображения, имеющие разрешение больше выбранного, путем интерполяции приводятся к единому размеру. После такой обработки полученная временная серия может использоваться при дальнейшей работе. Интерполя-

ция изображений происходит по одному из следующих методов:

– метод ближайшего соседа;

– билинейная интерполяция;

– бикубическая интерполяция.

При использовании объединения без приведения к единому разрешению никакой предварительной обработки данных не происходит. Во время проведения расчета вычисляются географические координаты точки, в которой происходит замер параметра. Для каждого типа изображений с различным пространственным разрешением определяются параметры пересчета по заданным географическим координатам. Данный метод не требует значительных вычислительных ресурсов, в отличие от первого метода.

Схема предлагаемого метода объединения спутниковых данных представлена на рис. 4.

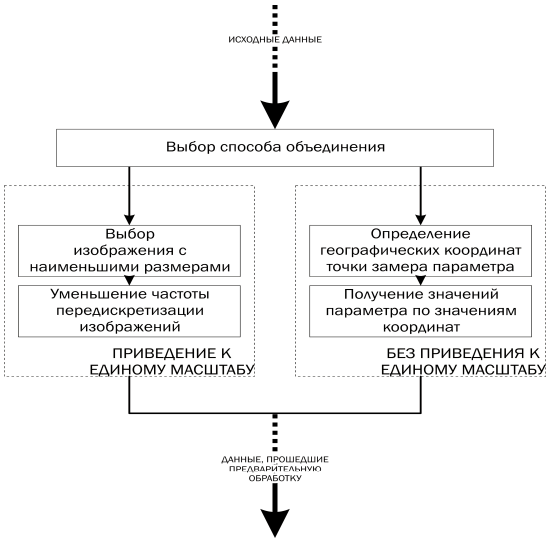


Рис. 4. Объединение данных

3. В основу методики создания композитов спутниковых изображений положены алгоритмы нерекурсивного медианного фильтра.

Некоторые архивные данные, такие как температурные данные поверхности океана спутников NOAA, аппаратура AVHRR в период с 1981 по 2000 гг. имеют лишь 8-дневные композиты. При изучении глобальных процессов функционирования мирового океана 8-дневные композиты зачастую не пригодны. Необходим более широкий временной диапазон композитов.

Представлены два случая обработки исходных данных. В первом случае исходные данные представляют собой mapped-данные. Это данные, в которых отсутствуют пропуски (шумы атмосферной составляющей), т. е. информация, прошедшая все виды межотраслевой обработки.

Во втором случае обрабатываются данные с пропусками значений параметра в некоторых пикселях. Для восстановления данных используется нерекурсивный фильтр с конечной импульсной характеристикой:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{P} b_i x(n-i),$$

где $x(n)$ – входной сигнал; $y(n)$ – выходной сигнал; b_i – коэффициенты фильтра; P – порядок фильтра.

Схема построения композитов изображений представлена на рис. 5.

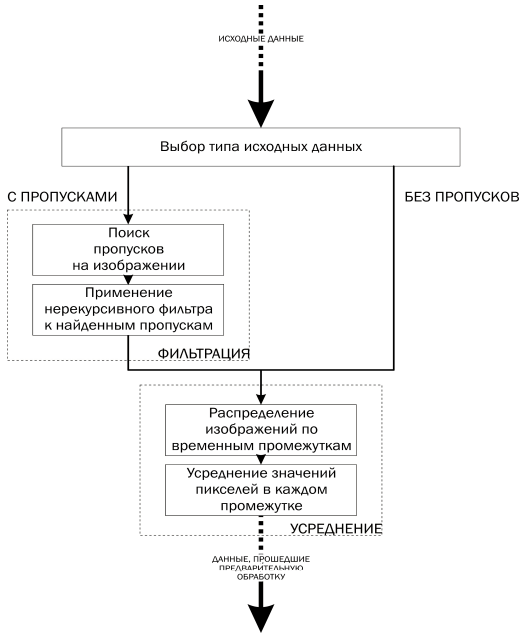


Рис. 5. Построение композитов

В результате проделанной работы предложены и разработаны оригинальная технология и методы последовательной предварительной, тематической и постобработки данных спутникового оборудования SeaWiFS, MODIS и NOAA, позволяющие изучать временную и пространственную изменчивость таких гидрологических и биологических характеристик Мирового океана, как температура поверхности и концентрация фитопигментов в поверхностном слое.

Разработаны алгоритмы, реализующие оригинальные методы предварительной обработки данных дистанционного зондирования океанической поверхности, отличающиеся большим количеством настраиваемых параметров анализа данных.

Полученные результаты могут применяться при изучении многолетней изменчивости биооптических характеристик морских вод, регистрировать изменения, происходящие в водных экосистемах под воздействием различных природных и антропогенных факторов. Выявлять аномальные изменения естественной динамики происходящих в океане процессов.

Библиографические ссылки

1. Геоинформационная система мониторинга океана и атмосферы : электрон. журн. [Электронный ресурс] / Е. Л. Подопригора, Т. С. Чистяков, В. А. Хованец, М. С. Пермяков // Исследовано в России. 2003. С. 1517–1526. URL: http://zhurnal.gpi.ru/articles/2003/128.pdf, свободный.

2. Крутков В. А., Полищук Ю. М. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды

и климата // Оптика атмосферы и океана. 2002. № 1. С. 12–20.

3. Построение автоматизированных систем сбора, хранения, обработки и представления спутниковых данных для решения задач мониторинга окружающей среды / М. В. Андреев, А. А. Галеев, В. Ю. Ефремов и др. // Солнечно-земная физика. 2004. Т. 118. № 5. С. 8–11.

4. Об использовании технологий хранилищ данных для обработки океанологической информации / М. В. Осипенко, С. А. Свиридов, В. А. Соловьев и др. // Современные методы и средства океанологических исследований : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. (2001, г. Москва) / ИО РАН. 2001. С. 36–38.

5. Структура хранилища и формат исследовательских данных по океанологии / А. А. Метальников, М. В. Осипенко, С. А. Свиридов и др. // Современные методы и средства океанологических исследований : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (25–27 нояб. 2003, г. Москва) / ИО РАН. 2003. Т. 1. С. 273–293.

6. Data Analysis System Developed for Ocean Color Satellite Sensors / K. Baith, R. Lindsay, G. Fu, C. R. McClain // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2001. Vol. 82. № 18. P. 202.

7. Использование технологий построения автоматизированных систем приема, обработки, архивации и распространения данных для мониторинга состояния морей / М. В. Андреев, В. А. Егоров, О. В. Ильин и др. // Информационные ресурсы об океане: актуальные проблемы формирования, распространения и использования в научных исследованиях и в морской деятельности. ОИР : материалы науч. прикл. конф. (8–10 октября 2002, г. Обнинск) / ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск, 2002. С. 146.

8. Соломатов Д. В. Сравнительный анализ программных средств обработки спутниковых данных // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 171–178.

9. Построение архивов данных метеорологических спутников на основе технологий глобальных сетей Интернет : препринт / М. Ю. Захаров, Е. А. Лупян, А. А. Мазуров и др. М. : ИКИ РАН, 1998.

A. V. Khodyaev, A. P. Shevyrnogov, A. V. Kartushinskiy

THEMATIC PROCESSING SOFTWARE OF SATELLITE DATA FOR OCEAN ECOLOGICAL MONITORING

Original technology of sequential processing of satellite data presented with picture patterns of chlorophyll distribution in the surface layer in the global ocean and sea surface temperature is considered in the article. This technology has been developed at Institute of biophysics, SB RAS. Analysis of challenges for thematic processing software developing is discussed. A brief description of preliminary stage is given. SeaWiFS, MODIS and NOAA picture images were used as input data.

Keywords: ocean color, satellite data processing, global ocean ecological monitoring.

© Ходяев А. В., Шевырногов А. П., Картушинский А. В., 2011

УДК 629.735.064

Л. Г. Шаймарданов, О. Г. Бойко

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТОКОВ ОТКАЗОВ АГРЕГАТОВ

Предложен метод эквивалентной линеаризации переменного параметра потока отказов агрегатов.

Ключевые слова: надежность функциональных систем, интегральная функция вероятности отказа, параметр потока отказов.

В работах [1–3] предложен метод расчета надежности сложных функциональных систем самолетов гражданской авиации при стационарности потока отказов ω. В соответствии с ним вероятность отказа функциональной системы рассчитывается на дискретных отрезках времени [0; t].

Для вероятности отказа агрегатов принято распределение равномерной плотности, при котором интегральная функция распределения записывается в виде

$$q(t) = \omega \cdot t. \quad (1)$$

Распределение с равномерной плотностью вероятности соответствует условию стационарности, накладываемому на Пуассоновский поток отказов. Здесь уместно отметить, что на практике потоки отказов функциональных систем более редки, чем агрегатов, а также Пуассоновские.

Приняв $t = 1$ из выражения (1) можно определить вероятность отказа за 1 час, как этого требуют нормы летной годности самолетов:

$$q(1) = \omega \cdot 1 = \omega_1. \quad (2)$$

Для принятия дискретного отрезка времени [0; t] протяженностью τ как единичного (например, 3600 с или продолжительность типового полета самолета) в указанных работах предложено приводить к τ параметр потока отказов, при этом

$$\omega_\tau = \omega \cdot \tau. \quad (3)$$

Тогда выражение (2) запишется в виде

$$q(\tau) = \omega_\tau \cdot 1. \quad (4)$$

При определении вероятности отказа агрегата на отрезке τ, принятом за единичный, интегральная функция определена уже как дискретное событие. Это обеспечивает корректность применения теоремы умножения вероятности для расчета надежности сложной системы.

Для системы с общим резервированием, состоящей из n параллельно включенных подсистем, содержащих по n последовательно соединенных агрегатов, выражение для расчета вероятности отказа записывается следующим образом:

$$Q_c = \{1 - [1 - q(\tau)]^n\}^n. \quad (5)$$

В отмеченных работах по выражению (5) определяется вероятность отказа системы только на дискретных отрезках времени [0; t]. Ему не приписываются свойства интегральной функции вероятности отказа системы.

В монографии [4] отмечается, что даже у обслуживаемых (восстанавливаемых) агрегатов потоки отказов могут быть медленно меняющимися во времени, т. е. $\omega = var$. При работе необслуживаемых систем, имеющих различные виды резервирования (горячий резерв, холодный резерв, скользящее резервирование), потоки отказов агрегатов, естественно, возрастают по мере увеличения наработки. В связи с этим, задача построения решения для расчета надежности системы при переменных по времени параметрах потоков отказов агрегатов является актуальной.

Для решения поставленной задачи необходимо заменить на единичном отрезке времени [0; t] переменный параметр потока отказов эквивалентным постоянным. Для этого возможно использование метода, разработанного в [1–3]. В теории колебаний для решения задачи с нелинейным трением широко используется метод эквивалентной линеаризации. В ряде случаев нелинейные дифференциальные уравнения с нелинейным диссипативным звеном не имеют решения. Для приведения таких уравнений к линейным дифференциальным уравнениям и используется этот метод. Нелинейное диссипативное звено заменяют линейным при условии равенства диссипируемой энергии колебаний при одинаковой амплитуде колебаний.

В рассматриваемой работе предлагается метод замены на отрезке времени [0; t] переменного параметра потока отказов $\omega(t)$ постоянным $\omega_э$, при условии равенства вероятности отказа агрегата $q(t)$ при постоянном и переменном параметрах потоков отказов. Для пояснения процедуры определение $\omega_э$ на отрезке времени [0, t] приведено на рис. 1.

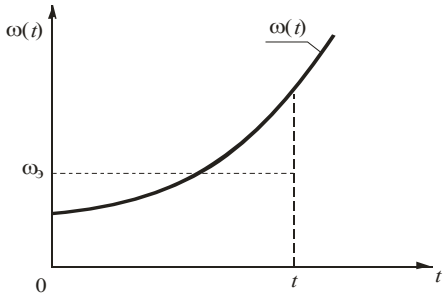


Рис. 1. К вопросу о замене переменного параметра потока отказов $\omega(t)$ постоянным $\omega_э$

Интегральная функция вероятности отказа агрегата вида (1) предполагает параметр потока отказов ω численно равным плотности вероятности распределения с равномерной плотностью. Тогда условие эквивалентности $\omega(t)$ и $\omega_э$ на отрезке [0; t] определится в виде

$$\omega_э \cdot t = \int_0^t \omega(\tau) d\tau, \quad (6)$$

откуда

$$\omega_э = \frac{\int_0^t \omega(\tau) d\tau}{t}. \quad (7)$$

В левой части равенства (6) $\omega_э$ принимается постоянным на отрезке времени [0; t]. Вместе с этим при изменении протяженности отрезка [0; t] изменяется и величина $\omega_э$. Но в пределах рассматриваемого отрезка [0; t] запись $\omega_э \cdot t$ означает не что иное, как определение вероятности отказа на отрезке при распределении с равномерной плотностью вероятности. Это обеспечивает возможность построения для агрегата интегральной функции распределения вероятности отказа, если задаться различными значениями протяженности отрезка [0; t].

В качестве иллюстрации предлагаемого метода на рис. 2 приведены различные реализации переменного значения параметра потока отказов $\omega(t)$ для ряда значений a и k:

$$\omega(t) = a + kt. \quad (8)$$

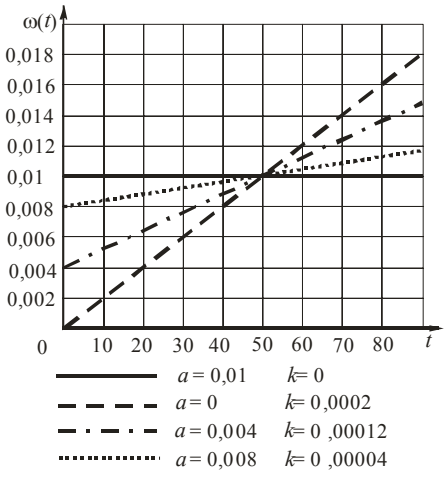


Рис. 2. Пример зависимостей параметра потока отказов от времени

На рис. 3. для рассматриваемого примера приведены интегральные функции распределения вероятности отказа агрегата, построенные в соответствии с предложенным методом эквивалентной линеаризации.

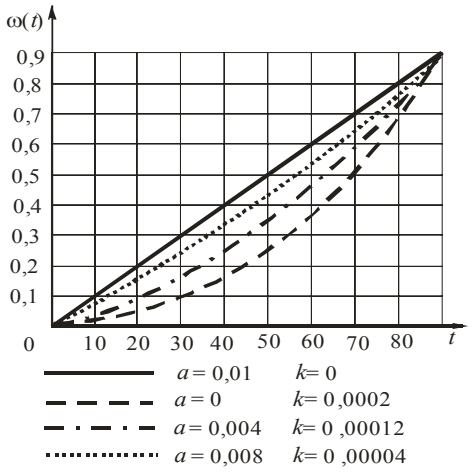


Рис. 3. Интегральные функции распределения вероятности отказа агрегата, построенные методом эквивалентной линеаризации

Разработанный метод эквивалентной линеаризации обеспечивает возможность решения задачи расчета надежности сложных функциональных систем, приведенной в работах [1–3] для случая, когда параметры потоков отказов агрегатов переменны во времени.

Библиографические ссылки

1. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Математическое моделирование схемной надежности сложных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М., 2010. Вып. № 3. С. 82–88.

2. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография / РАН. М., 2009. (Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий).

3. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Моделирование надежности агрегатов функциональных систем самолетов // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. М., 2010. Вып. № 5. С. 35–39.

4. Новожилов Г. В., Неймарк М. С., Цесарский Л. Г. Безопасность полетов, концепция и технологии. М. : Машиностроение, 2003.

L. G. Shaymardanov, O. G. Boyko

COMPLEX SYSTEMS RELIABILITY CALCULATION TASK SOLUTION METHOD WITH VARIABLE AGGREGATES BREAKDOWN STREAM PARAMETERS

A method of variable aggregates breakdown stream parameters equivalent linearisation is proposed in the article.

Keywords: functional systems reliability, breakdown probability integral function, breakdown stream parameter.

© Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г., 2011

Раздел
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 539.388.2

А. Е. Буров

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ КОМПОЗИТНОГО УГОЛКОВОГО ЭЛЕМЕНТА ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ*

Представлены результаты экспериментальных исследований и численного анализа напряженно-деформированного состояния, возникающего при изготовлении детали, выполненной из композитного материала.

Ключевые слова: технологические напряжения, численный анализ, пружинение, полимерный композит.

Остаточные напряжения, возникающие при изготовлении изделий из полимерных волокнистых композитов, обусловлены морфологическими изменениями на стадии охлаждения и различием термоупругих свойств армирующего элемента и матрицы. При охлаждении от температуры формования до комнатной температуры изделия из ортотропного композита, содержащего цилиндрический сегмент, помимо изменения в размерах может возникать искажение сечения, вызванное величиной и распределением остаточных напряжений [1]. Последнее, известное как «пружинение», происходит, в основном, за счет анизотропии термоупругих свойств материала.

Одна из первых моделей, объясняющих природу искажения формы элементов из однонаправленных композитов, содержащих U-образный сегмент, была предложена в работе [2]. Принималось, что изменение сечения не зависит от упругих характеристик материала, а определяется лишь отличием коэффициента линейного расширения в радиальном и окружном направлениях и интервалом изменения температуры. Учитывая простоту данного подхода, хорошее соответствие расчетных значений экспериментальным данным – скорее совпадение, чем закономерность. Об этом свидетельствуют результаты работы [3], в которой данная модель была использована для описания пружинения деталей из стеклопластика. Существенное расхождение теории с экспериментом привело авторов к выводу, что данный эффект определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС), формируемым в процессе охлаждения. Следует отметить, что гораздо раньше [1] искажение формы незамкнутого контура было объяснено остаточными напряжениями, возникающими из-за цилиндрической анизотропии свойств материала. Более сложный термоупругий анализ был использован в работе [4]. Рассматривался только цилиндрический сегмент детали. Обоснованность модели была подтверждена большим объемом экспериментальных результатов, полученных на углепластиках. Однако термоупругая постановка задачи не всегда может быть достаточной, так как не учитывает зависимость деформирования полимерных материалов от скорости нагружения.

Результаты исследований [4–6] показывают, что величина угла пружинения зависит не только от физико-механических свойств материала, но и от ряда других параметров: скорости охлаждения, последовательности укладки слоев по толщине, взаимодействия с инструментом, химической или кристаллизационной усадки, геометрии изделия. Сложность и многофакторность задачи прогнозирования остаточных напряжений и их влияния на стабильность формы изделий из композитов определяет необходимость ее решения численными методами [5–7].

В данной работе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований эффекта пружинения детали V-образного поперечного сечения из волокнистого углепластика на основе полиамида 12 (ПА 12). Анализ НДС детали выполнен на основе линейной вязкоупругой модели, реализованной на базе метода конечных элементов.

Уголок размером 70×70×50 мм, толщиной 2,5 мм и внешним радиусом цилиндрического сегмента 5 мм изготавливали методом прямого прессования 8 слоев однонаправленной углеродной ткани фирмы Schappe Techniques (Франция). Было изготовлено 3 уголка. Ткань состоит из жгутов смешанных углеродных и полиамидных волокон, сшитых стеклянной нитью. Массовые доли компонентов составляют, соответственно, 68,25:30,25:1,5 (объемное содержание волокна 56 %). Степень кристалличности связующего, которая практически не меняется при скоростях охлаждения 1–100 °С/мин, составляет 41 %. Температура стеклования ПА 12 около 42 °С. Значения коэффициентов линейного расширения и теплопроводности композита в исследуемом диапазоне температур получены экспериментально и приведены в таблице. Направление 1 соответствует направлению армирования.

Коэффициенты линейного расширения однонаправленного слоя композита

Температура, °С	$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, 1/°С	$\alpha_2 \cdot 10^{-6}$, 1/°С	$\alpha_3 \cdot 10^{-6}$, 1/°С
< 50	0,6	61,0	78,0
50	1,8	76,0	104,0
150	2,0	81,0	111,0

Стальную пресс-форму, с уложенными в ней слоями ткани, нагревали до 210 °С и выдерживали при удельном давлении 1,5 МПа в течение 10 мин, а затем охлаждали до комнатной температуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-08-00945).

На рис. 1 представлено изменение температуры в течение цикла охлаждения, регистрируемое с помощью термопар, спаи которых помещались в непосредственной близости от рабочих поверхностей пресс-формы. После извлечения детали измерялись ее геометрические параметры. Величина угла между полками уголка составила 88,4°±0,2; 88,3°±0,3 и 88,1°±0,2. Интервалы показывают различие в значениях, определенных по внешним и внутренним поверхностями полок.

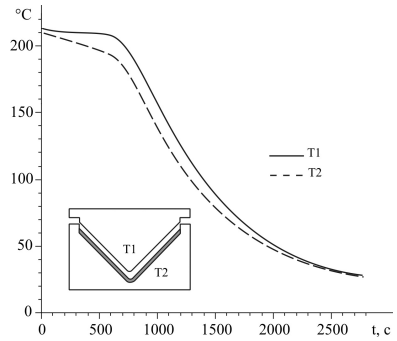


Рис. 1. Температура на нижней и верхней поверхностях детали

Релаксационные свойства ПА 12 определяли при кручении образцов прямоугольного сечения размером 10 × 1,5 мм. Для снятия возможных остаточных напряжений образцы перед испытаниями выдерживали при температуре 50 °С в течение двух дней. Временные зависимости модуля сдвига получены при постоянной 0,5 % деформации образцов в течение 100 с в температурном диапазоне от 25 до 150 °С с шагом 5 °С (рис. 2). Обобщенная кривая релаксации была построена согласно принципу температурно-временной суперпозиции для температуры приведения 45 °С. Экспериментальная функция температурно-временного смещения a_T в диапазоне температур 25–150 °С аппроксимирована уравнением Вильямса–Ландела–Ферри [8]:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}, \qquad (1)$$

где эмпирические константы C_1, C_2, равны, соответственно, 30,8 и 180,5.

Подобная зависимость получена также методом динамического механического анализа для динамического модуля сдвига G' в интервале 30–110 °С ($C_1 = 28{,}4$; $C_2 = 165{,}6$).

Вязкоупругое поведение связующего представлялось с помощью обобщенной модели Максвелла:

$$G(t) = G_0 + \sum_1^N G_i \exp(-\frac{t}{\lambda_i}), \qquad (2)$$

где G_i – модули сдвига и соответствующие времена релаксации.

Учитывая, что получить экспериментально все компоненты тензора функций релаксации затруднительно даже для трансверсально-изотропного материала, для их определения использовалась микромеханическая модель [9], предполагая, что свойства углеродных волокон не изменяются. Вязкоупругие характеристики однонаправленного слоя были получены из упругого решения с помощью преобразования Лапласа–Карсона [8].

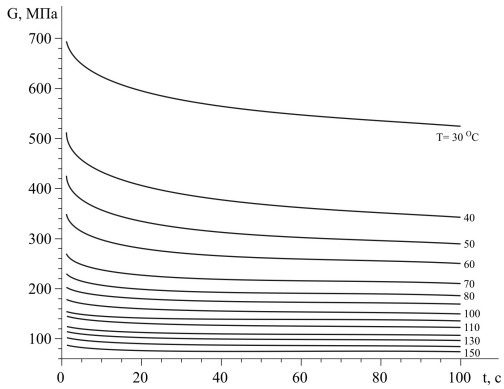


Рис. 2. Экспериментальные зависимости модуля упругости при сдвига ПА12 от времени при различных температурах

Помимо изменения температуры, усадка полукристаллических полимеров является следствием формирования кристаллической фазы. Однако при реализованных скоростях охлаждения (порядка 10 °С/мин) кристаллизация ПА 12 происходит в интервале 150–160 °С, т. е. значительно выше температуры отверждения и когда модуль упругости материала имеет низкое значение. Следовательно, влияние кристаллизационной усадки на величину остаточных напряжений незначительно и в расчете не учитывалось.

При изменении температуры деформируется не только композит, но и оснастка. Как правило, термомеханические характеристики материала оснастки и композита различны, что препятствует свободному деформированию последнего. Как показано в работе [10], угол пружинения может изменяться до 90 % в зависимости от материала оснастки. Естественно предположить два предельных случая взаимодействия контактирующих поверхностей: совместное деформирование и свободное (без трения) проскальзывание изделия по плоскости контакта. Очевидно, что в реальности граничные условия соответствуют промежуточному состоянию и зависят от конфигурации и свойств элементов. Для оценки влияния механического взаимодействия на границе «инструмент–изделие» на формирование остаточных напряжений в модели предусмотрен граничный слой конечных элементов. Идеальный контакт моделируется, если модуль сдвига равен модулю материала инструмента (сталь), тогда как значение близкое к нулю определяет свободное скольжение. Промежуточные соотношения сдвиговой жесткости слоя и материала пресс-формы определяет степень взаимодействия инструмента и изделия.

Учитывая симметрию детали, расчет выполнялся для 1/2 части сечения уголка и пресс-формы в условиях плоского деформированного состояния. Конечно-

элементная модель, состоящая из 3 200 четырехугольных восьмиузловых элементов, и граничные условия представлены на рис. 3.

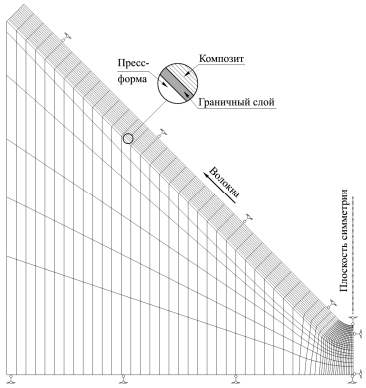


Рис. 3. Конечно-элементная модель

Анализ проводился в три этапа.

1. Предполагая, что влияние деформаций на теплопроводность композита незначительно, тепловой анализ и расчет НДС выполнялись раздельно. Задача нестационарного теплообмена решалась с помощью программного комплекса ANSYS (см. URL: http://www.ansys.com), граничными условиями для которой являлись экспериментальные значения температуры на поверхностях образца. Предварительно были выполнены расчеты для определения оптимальной дискретизации времени цикла охлаждения с точки зрения стабильности решения и времени расчета. Наименьший шаг расчета был выбран для интервалов температур отвердевания (140–150 °С) и стеклования (40–50 °С), для которых характерно резкое изменение свойств материала.

2. Длительность каждого шага нагружения, значения температуры в каждом элементе, определенные на этапе 1, и расчетные релаксационные модули использовались как исходные данные для определения НДС композита. ANSYS не обладает возможностями вязкоупругого анализа для ортотропных материалов. Для этих целей выполнялась пользовательская процедура, реализующая метод решения задачи деформирования анизотропного материала под действием температурной и/или механической нагрузки, представленный в работе [11]. Алгоритм основан на численном решении интегрального уравнения Больцмана–Вольтерра:

$$\sigma_i = \int_{-\infty}^{t} C_{ij}(T, t-\tau)\frac{\partial(\varepsilon_j - \varepsilon_j^T)}{\partial\tau}d\tau, \ (i, j = 1, 2...6), \qquad (3)$$

где C_{ij} – функции релаксации; T – температура; t – время; ε_j – общие деформации; ε_j^T – термические деформации в ненапряженном состоянии.

Для термореологически простого материала уравнение (3) может быть записано в виде:

$$\sigma_i = \int_0^t C_{ij}(T_0, \xi - \xi')\frac{\partial(\varepsilon_j - \varepsilon_j^T)}{\partial\tau}d\tau, \qquad (4)$$

где ξ, ξ' – приведенное время, определяемое следующим образом:

$$\xi = \int_0^t \frac{1}{a_T}d\tau, \quad \xi' = \int_0^{t'} \frac{1}{a_T}d\tau. \qquad (5)$$

Значение параметра a_T, в (5) определяется согласно (1).

Напряжения во времени $t + \Delta t$ вычисляются по формуле

$$\sigma_i(t + \Delta t) = \sigma_i(t) + \Delta\sigma_i(t). \qquad (6)$$

Приращение напряжений аппроксимируется следующим выражением:

$$\Delta\sigma_i(t) = C_{ij}(\Delta\xi)\Delta(\varepsilon_j - \varepsilon_j^T) + \Delta\sigma_i^R(t), \qquad (7)$$

где C_{ij} $(\Delta\xi)$ вычисляются по формулам (2) и (5); $\Delta\sigma_i^R(t)$ – функция, которая отражает историю нагружения и определяется рекуррентной процедурой.

3. На заключительном этапе анализа моделировалось извлечение изделия из пресс-формы – из расчетной схемы удалялись все кинематические ограничения, накладываемые инструментом. Величину угла пружинения определяли путем сравнения начальной формы уголка, обусловленной геометрией инструмента, с контуром детали, полученным в результате расчета.

Для сравнения был также выполнен термоупругий анализ, учитывающий зависимость механических свойств материала от температуры.

Пока связующее композита находится в жидком состоянии, в композите практически отсутствуют внутренние напряжения. При снижении температуры ниже температуры отверждения начинают возникать напряжения, обусловленные анизотропией термомеханических свойств, а также ограничений со стороны пресс-формы. При этом формируется ассиметричное распределение окружных (вдоль армирования) напряжений по толщине: сжимающие напряжения на нижней части, растягивающие – на верхней части детали (рис. 4). Однако приращение напряжений не прямо пропорционально изменению температуры и определяется двумя основными факторами: релаксацией, скорость которой больше при более высоких температурах, и изменением значений коэффициента линейного расширения. Поэтому, несмотря на то, что основная усадка композита происходит выше 100 °С, большая часть напряжений формируется при более низких температурах.

Другим фактором, влияющим на формирование внутренних напряжений, является возникающий при охлаждении температурный градиент. Слои материала, находящиеся ближе к поверхности пресс-формы, охлаждаются быстрее, чем внутренние. Кроме того, вследствие особенностей конструкции пресс-формы скорости охлаждения верхней и нижней частей пресс-формы отличаются. Это в свою очередь приводит к возникновению градиента свойств материала.

Следует отметить, что термоупругий анализ, не учитывающий временной фактор, прогнозирует распределение напряжений, которое отличается более

высоким максимальным значениям и, в меньшей степени, формой. Различие в максимальных значениях составляет порядка 10 %.

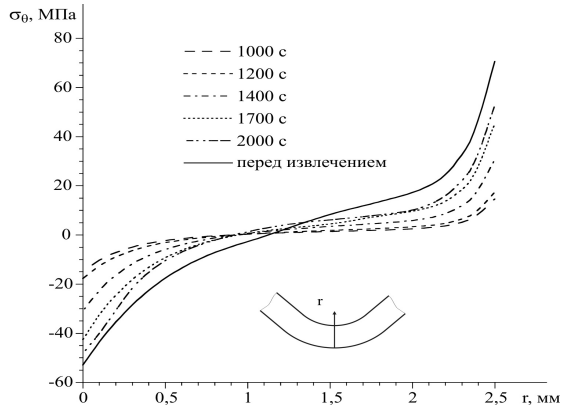


Рис. 4. Кинетика изменения окружных напряжений в цилиндрической части детали при идеальном контакте по поверхности форма-композит

При снятии ограничений, накладываемых инструментом, происходит существенное снижение уровня и перераспределение внутренних напряжений. Остаточные окружные напряжения в цилиндрическом сегменте характеризуются симметричным распределением по толщине с отрицательными значениями на внешних поверхностях и положительными – во внутренних слоях (рис. 5, значения в Па).

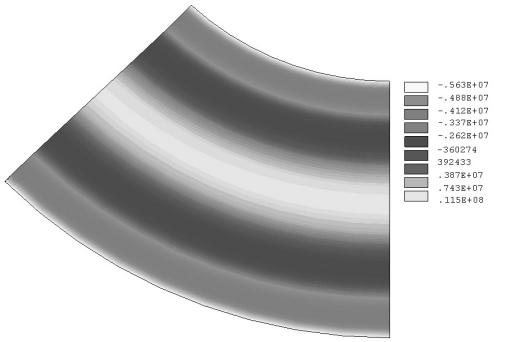


Рис. 5. Остаточные напряжения после снятия детали с оснастки

Начальный и деформируемый контуры детали и полученные значения угла пружинения в зависимости от жесткости граничного слоя представлены на рис. 6. Наилучшее соответствие между расчетными и экспериментальными данными наблюдается при больших соотношениях модулей сдвига граничного слоя и материала пресс-формы. Наименьшее искажение формы, которое в 2 раза меньше экспериментального значения, получено в предположении свободного деформирования композита вдоль поверхностей инструмента.

Следует отметить, что принятая модель материала и расчетная схема не прогнозируют искажение прямоугольного контура полок уголка, наблюдаемое в эксперименте. На готовых деталях полки имеют небольшую кривизну с выпуклой внешней поверхностью. Это можно объяснить неоднородностью структуры композита по толщине, которая формируется в процессе изготовления сложных по геометрии деталей. Типичным примером может служить образование на внешних поверхностях детали утолщенного слоя полимера, что приводит к градиенту степени армирования и, следовательно, термомеханических свойств [1]. Тогда как в модели использовались характеристики композита, рассчитанные в предположении однородного ортотропного материала.

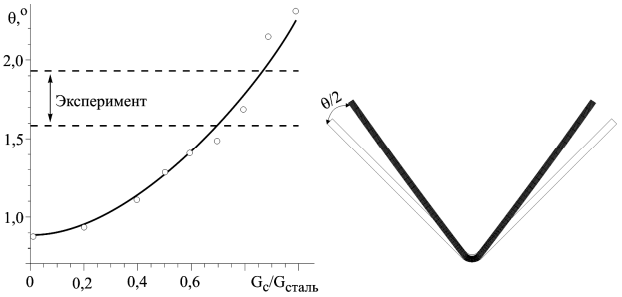


Рис. 6. Значение угла пружинения как функция отношения модулей сдвига граничного слоя и материала пресс-формы

Полученные результаты позволяют считать перспективным используемый алгоритм решения задачи определения остаточных напряжений, возникающих при изготовлении изделий из армированных материалов на полимерной основе и прогнозировать их форму. Однако в дальнейших расчетах следует учитывать неоднородность структуры материала, а также более точно моделировать взаимодействие «изделие–инструмент».

Библиографические ссылки

1. Виноградов В. М. Остаточные напряжения в деталях из пластических масс // Пластические массы. 1975. № 4. С. 20–31.

2. O'Neill J. M., Rogers T. G., Spencer A. J. M. Thermally induced distortions in the moulding of laminated channel sections // Mathematical Engineering in Industry. 1988. Vol. 2. P. 65–72.

3. Dykes R. J., Horrigan D. P. W., Bhattacharryya D. Numerical analysis of shape fixability of continuous fibre reinforced thermoplastics // Composites Processing and Microstructure. 1997. Vol. 4. ICCM-11. Cambridge, UK. P. 352–359.

4. Jain L. K., Mai Y.-W. Stress and deformation induced during manufacturing. Part II: A study of the spring-in phenomenon // Journal of Composite Materials. 1997. Vol. 31. P. 696–712.

5. Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts / G. Fernlund, N. Rahman, R. Courdji [et al.] // Composites Part A. 2002. Vol. 33. P. 341–351.

6. Thermoviscoelastic anisotropic analysis of process induced residual stresses and dimensional stability in real polymer matrix composite components / S. Clifford, N. Jansson, W. Yu [et al.] // Composites Part A. 2006. Vol. 37. P. 538–545.

7. Сметанников О. Ю., Труфанов Н. А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклующихся телах // Вычислительная механика сплошной среды. 2008. Т. 1. № 1. С. 92–108.

8. Ильюшин А. А. Труды. Т. 3. Теория термовязкоупругости. М. : Физматлит, 2007.

9. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М. : Мир, 1982.

10. Bapanapalli S. K., Smith L. V. A linear finite element model to predict processing-induced distortion in FRP laminates // Composites: Part A. 2005. Vol. 36. P. 1666–1674.

11. Zocher M. A., Groves S. E., Allen D. H. A three-dimensional finite element formulation for thermoviscoelastic orthotropic media // Int. J. Numer. Meth. Eng. 1997. Vol. 40. P. 2267–2288.

A. E. Burov

PREDICTING OF A COMPOSITE ANGLE ELEMENT WARPAGE DUE TO INDUCED STRESS PROCESS

The article presents experimental and numerical analysis results of induced stress-strain state in the process of manufacturing of a piece of composite material.

Keywords: process induced stress, numerical analysis, springforward, polymer composite material.

© Буров А. Е., 2011

УДК 621.924

В. А. Левко, П. А. Снетков, Е. Б. Пшенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КАНАЛОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ СЕЧЕНИЯ*

Проведены исследования потока рабочей среды в кольцевой щели. Установлена степень влияния площади сечения щели и состава рабочей среды на параметры обработки. Разработаны рекомендации по применению выравнивающих устройств.

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, кольцевая щель, рабочая среда, площадь поперечного сечения, выравнивающее устройство.

В номенклатуре деталей машиностроительного производства встречаются детали, имеющие внутренние каналы с переменной формой поперечного сечения. Например, для внутреннего канала сопел-насадок характерно сочетание цилиндрической и конусной частях.

Практика экспериментальной абразивно-экструзионной обработки (АЭО) таких деталей без применения каких-либо выравнивающих устройств выявила неравномерность качества обработанной поверхности каналов в цилиндрической и конусной части.

Рабочая среда при АЭО представляет собой вязкоупругую среду, наполненную абразивными зернами. Свойства рабочей среды описаны в работах [1; 2]. При сдвиговом течении в обрабатываемом канале в потоке рабочей среды возникают как касательные, так и нормальные напряжения. Абразивные зерна при течении образуют вязкоупругие цепочки, деформация отдельных звеньев которых оказывает дополнительное влияние на общую деформацию рабочей среды [3]. Вид и характер деформации рабочей среды оказывает влияние на условия контакта микровыступов единичного абразивного зерна с микровыступами обрабатываемой поверхности и учитывается в модели контактных взаимодействий при АЭО [4].

Визуальные исследования течения рабочей среды в конусных каналах позволили уточнить качественную картину потока. Установлено, что равномерности обработки в конусном канале без применения специальных выравнивающих устройств добиться сложно, поскольку изменение профиля потока рабочей среды происходит непосредственно в обрабатываемом канале [5].

Для обеспечения равномерной обработки таких каналов нами предложено устройство, выравнивающее сечение канала по его длине. При этом происходит переход от течения среды через местное сопротивление (конус) к течению в кольцевом канале.

Исследования проведены в два этапа на установке УЭШ-25 с использованием устройства, которое имитирует течение в кольцевой щели (рис. 1). На первом этапе установлены эмпирические зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra, а также величина ее изменения в ходе обработки ΔRa и величина изменения диаметра отверстия ΔD исследуемого образца в зависимости от дисперсности наполнителя Ba′ среды и площади зазора $S_{\text{заз}}$ между обрабатываемой поверхностью и внутренним телом.

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные, научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.». Грант № П 11 21.

Образец *1* помещен во внутреннюю выточку корпуса *4* и закрыт крышкой *3*, образующей с корпусом *4* замковое соединение. Внутренние диаметры образца *1*, крышки *3* и корпуса *4* имеют одинаковые номинальные размеры. С других торцев корпуса *4* и крышки *3* выполнены ступенчатые выточки, на которых базируются основания *5*. В эти основания вставлялось внутреннее тело *2*. При помощи переходников *6* устройство смонтировано в установку, а его части закреплены относительно друг друга зажимным устройством.

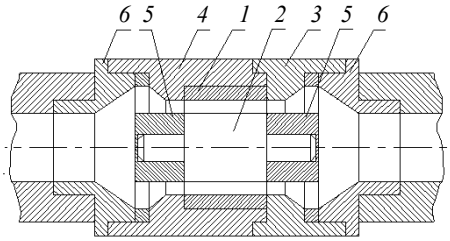


Рис. 1. Устройство-имитатор кольцевой щели

Изменением диаметра внутреннего тела варьировалась площадь зазора $S_{заз}$ между обрабатываемой внутренней поверхностью образца *1* и внутренним телом *2*. Основания *5* выполнены в виде диска со ступицей. В центральную выточку ступицы оснований *5* установлены верхняя и нижняя ступени внутреннего тела *2* соответственно, причем торцы оснований являются установочной базой для основной ступени внутреннего тела *2*. Диски оснований *5* закреплены в выточках корпуса *4* и крышки *3* и имеют по четыре отверстия – канала, по которым рабочая среда течет через устройство. Наружные диаметры основных ступеней сменных внутренних тел *2* обеспечивают зазоры $S_{заз}$ с площадью поперечных сечений 10; 17,5 и 25,5 мм^2. Набор сменных внутренних тел и оснований показан на рис. 2.

Шероховатость Ra обработанной поверхности измерена на профилометре М 252, а величина ΔD – на линейном микроскопе УИМ. Перед измерениями образцы выдерживались в течение 30 минут при температуре 20± 2 ^{o}C.

Рис. 2. Основание и набор сменных внутренних тел

Условия эксперимента: внутренний диаметр образцов – 30 мм; площадь зазора – 10; 17,5; 25,5 мм^2; рабочее входное давление – 9,0 МПа; Ba′ – 320, 400, 500 мкм; содержание полимера в среде – 40 %; Ka′ – 60 %; материал образцов – сталь 38ХГС; количество циклов – 20.

Эксперименты проведены по плану Коно (m = 2). Для математической обработки произведено кодирование переменных: $X_1 = \text{Ba}'$; $X_2 = S_{заз}$; $Y_1 = \text{Ra}$, ΔRa, ΔD. Каждый опыт повторялся шесть раз с рандомизацией во времени.

Для шероховатости Ra обработанной поверхности уравнение регрессии в натуральном выражении имеет вид

$$\text{Ra} = -0{,}079 - 0{,}00016\text{Ba}' + 0{,}034S_{заз} + \\ + 0{,}0000016\text{Ba}'^2 - 0{,}001S_{заз}^2 + 0{,}00001\text{Ba}'S_{заз}.$$

График зависимости Ra от Ba′ и $S_{заз}$ (рис. 3) показывает, что при АЭО средой с Ba′ = 320 мкм и Ba′ = 400 мкм уменьшение площади зазора уменьшает величину Ra. Для среды Ba′ = 500 мкм наблюдается минимум в области $S_{заз}$ = 17,5 мм^2.

Это объясняется тем, что при уменьшении величины зазора удельное давление рабочей среды на обрабатываемую поверхность возрастает, но скорость течения потока становится меньше. В данном интервале значений для сред Ba′ = 320 мкм и Ba′ = 400 мкм при уменьшении $S_{заз}$ снижение скорости потока не влияет столь существенно на производительность обработки как увеличение давления среды в канале. Для рабочей среды дисперсностью Ba′ = 500 мкм уменьшение зазора ниже показателя $S_{заз}$ = 17,5 мм^2 значительно снижает расходно-напорные характеристики сдвигового течения, что ухудшает условия обработки. Аналогичная картина наблюдается и для изменения шероховатости поверхности в процессе обработки ΔRa.

Для изменения шероховатости ΔRa уравнение регрессии в натуральном выражении имеет вид

$$\Delta\text{Ra} = 1{,}638 - 0{,}006\text{Ba}' + 0{,}0166S_{заз} + \\ + 0{,}0000061\text{Ba}'^2 - 0{,}0008S_{заз}^2 + 0{,}00006\text{Ba}'S_{заз}.$$

Для сред дисперсностью до 400 мкм уменьшение зазора между внутренним телом и обрабатываемой поверхностью увеличивает изменение шероховатости при АЭО. Для сред зернистостью 500 мкм и более при $S_{заз}$ < 17,5 мм^2 показатель ΔRa уменьшился. Эти среды имеют повышенную жесткость, что вызывает при уменьшении площади зазора снижение скорости потока РС.

Для изменения диаметра обрабатываемого отверстия ΔD уравнение регрессии в натуральном выражении выглядит следующим образом:

$$\Delta D = 1{,}324 - 0{,}0003\text{Ba}' - 0{,}0154S_{заз} + 0{,}000003\text{Ba}'^2 + \\ + 0{,}0009S_{заз}^2 - 0{,}00000003\text{Ba}'S_{заз}.$$

График зависимости ΔD от Ba′ и $S_{заз}$ (рис. 4) показывает, что при АЭО средами с Ba′ = 320 мкм и Ba′ = 400 мкм уменьшение площади зазора увеличивает величину ΔD.

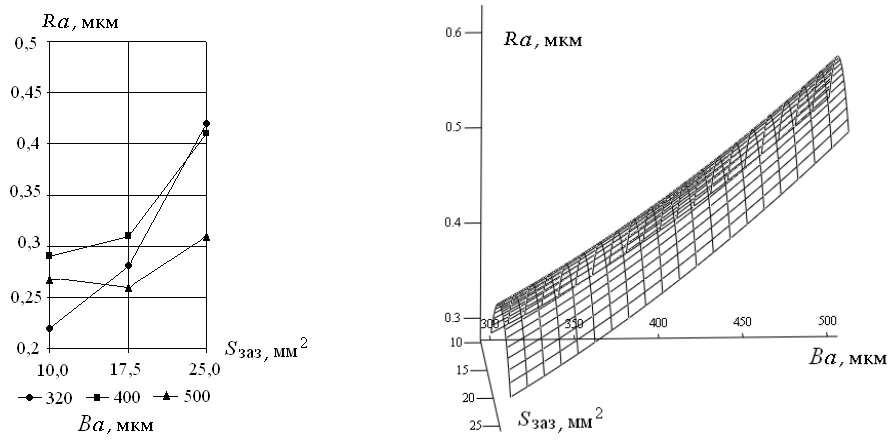


Рис. 3. Зависимость шероховатости Ra от зернистости Ba′ и площади зазора кольцевой щели $S_{заз}$:
а – в декартовой системе координат; *б* – поверхностный

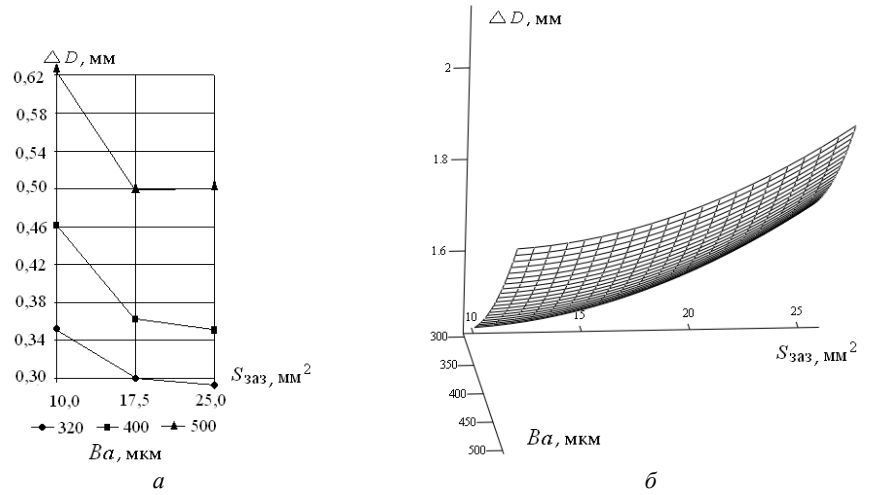


Рис. 4. Зависимость изменения диаметра отверстия ΔD от Ba′ и площади зазора кольцевой щели $S_{заз}$:
а – в декартовой системе координат; *б* – поверхностный

Для среды дисперсностью Ba′ = 500 мкм наблюдается минимум в области $S_{заз}$ = 17,5 мм^2. Это объясняется тем, что при уменьшении величины зазора удельное давление среды на обрабатываемую поверхность возрастает, но скорость течения потока становится меньше. В данном интервале значений для сред Ba′ = 320 мкм и Ba′ = 400 мкм при уменьшении $S_{заз}$ снижение скорости потока не влияет столь существенно на производительность обработки как увеличение давления потока в канале.

Для среды с дисперсностью наполнителя Ba′ = 500 мкм уменьшение зазора после $S_{заз}$ = 17,5 мм^2 значительно снижает скорость течения, что ухудшает условия обработки. Применение выравнивающего устройства позволило повысить производительность (ΔRa, ΔD) и качество (шероховатость Ra поверхности после обработки) процесса АЭО. Лучшие результаты достигнуты при АЭО средой Ba′ = 500 мкм с использованием выравнивающего устройства, обеспечивающего площадь зазора $S_{заз}$ = 17,5 мм^2.

Для подтверждения экспериментальных результатов и моделирования обработки сопла-насадки спроектировано и изготовлено разъемное приспособление – имитатор внутренней поверхности сопла-насадка (рис. 5). Съемные образцы-вкладыши 5 позволили провести оценку параметров АЭО. Материал образца и имитатора – сталь 38ХГС.

Рис. 5. Приспособление – имитатор сопла-насадка:
1 – крышка; 2 – основание; 3 – цилиндрическая часть канала;
4 – конусная часть канала; 5 – пазы для съемных образцов

Для реализации изменения режима АЭО от течения в конусе к течению в кольцевой щели спроектированы и изготовлены выравнивающие приспособления (рис. 6). Диаметры приспособлений подобраны так, чтобы обеспечить необходимую площадь поперченного сечения кольцевой щели.

Рис. 6. Выравнивающие устройства, реализующие разную площадь сечения кольцевой щели

На основании результатов предыдущих исследований в качестве основной среды выбрана среда следующего состава: наполнитель – нормальный электрокорунд 18А Ba′ = 320 мкм, Ka = 50 %; плотность среды ρ = 1410,32 кг/м^3, количество абразивных зерен $K_{КЗ}$ = 92,9 10^5/кг; упругие свойства – модуль Юнга E = 119 600, величина коэффициента Пуассона μ = 0,411. Согласно эмпирической зависимости [6] при $P_{вх}$ = 6 МПа коэффициент эффективной вязкости η = 36320 Па·с.

Одной из проблем исследований было сравнение расходно-напорных характеристик потока среды в цилиндрической части канала и кольцевой щели между выравнивающим приспособлением и внутренней поверхностью конусной части канала. Для этого рассчитаны расход потока среды (табл. 1) и градиента скоростей γ (табл. 2) на стенке в цилиндрическом и кольцевом каналах.

Таблица 1

Отношение расходов РС в цилиндрическом канале и кольцевой щели

Индекс течения n	Расход РС Q, м^3/с·10^{-5}		$Q_{цил}$ / $Q_{кол}$
	$Q_{цил}$	$Q_{кол}$	
1	0,70	0,11	6,4

Таблица 2

Отношение пристеночных градиентов скоростей РС в цилиндрическом канале и кольцевой щели

Индекс течения n	Пристеночный градиент скорости потока		$\gamma_{цил}$ / $\gamma_{кол}$
	$\gamma_{цил}$	$\gamma_{кол}$	
1	4,57	3,80	1,2

Размеры каналов подбирались из условия равенства площадей их поперечных сечений $S_{цил}$ = $S_{кол}$. Цилиндрический канал насадка имеет радиус R = 0,0125 м. Следовательно площадь его поперченного сечения $S_{цил}$ = 0,00049 м^2. Для кольцевой щели требуемое условие соблюдается при радиусе отверстия $R_{отв}$ = 0,0156 м и радиусе выравнивающего устройства $R_{уст}$ = 0,0094 м.

Расход в кольцевой щели меньше, чем в цилиндрическом канале в 6,4 раза, а пристеночный градиент давлений в 1,2 раза. Чтобы уравнять расход и пристеночный градиент для обоих каналов необходимо для кольцевой щели увеличить площадь зазора $S_{кол}$ в 1,2...6,4 раза, по сравнению с рассмотренной выше и равной площади цилиндрического канала $S_{цил}$ = 0,00049 м^2. Увеличение площади зазора между обрабатываемой конусной поверхностью и выравнивающим приспособлением в 1,2 раза обеспечило равные расходы в кольцевом и цилиндрическом каналах.

Для дальнейшей обработки применено выравнивающее устройство, обеспечивающее $S_{кол}$ = 17,5 мм^2. Контролируемыми параметрами были Ra, ΔRa и Δh. Измерение данных параметров произведено после 5, 10, 15, 20, 25 и 30 циклов обработки. Количество обработанных образцов – 6. Требуемая величина шероховатости поверхности Ra = 0,32 мкм достигнута за 20 циклов обработки как в цилиндрической части, так и в конусной части канала. Съем металла составил 0,015 мм на сторону. Дальнейшая обработка позволила через 10 циклов обеспечить шероховатость Ra = 0,22 мкм при съеме металла 0,19 мм на сторону.

Исходное состояние поверхности образца перед АЭО приведено на рис. 7.

На образце (рис. 7, *а*) шероховатость поверхности не имеет доминирующей ориентации. Параметры исходной шероховатости Ra ≈ 0,85 мкм. Увеличенное изображение состояния поверхности (рис. 7, *б*) этого позволяет визуально наблюдать раковины протяженностью 20…200 мкм, расположенные хаотично. На поверхности наблюдаются риски, расположенные перпендикулярно основному направлению потока среды при АЭО. Ширина рисок составляет 5…30 мкм, протяженность – по всей ширине образца.

Состояние поверхности образца после 15 циклов АЭО представлено на рис. 8.

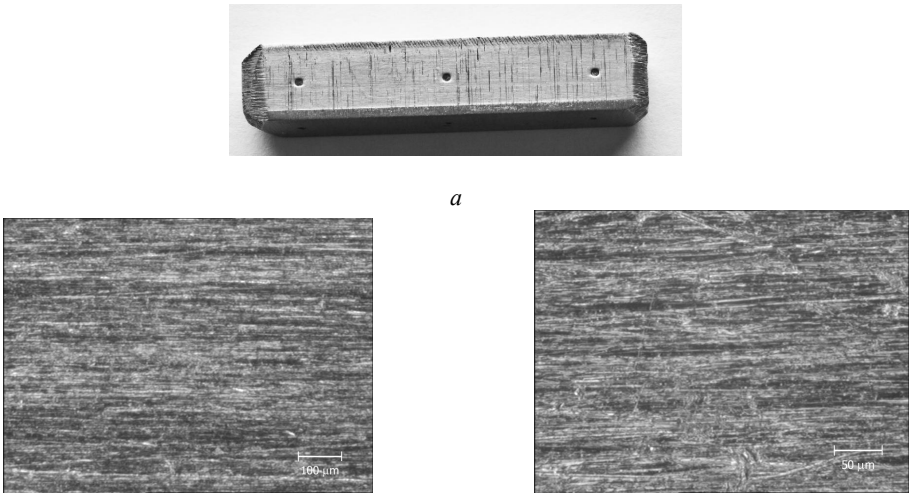
На образце (рис. 8, *а*) шероховатость поверхности приобрела доминирующее направление, совпадающее с направлением потока среды. Измеренная величина шероховатости Ra ≈ 0,31 мкм. Структура поверхности изменилась. При увеличении в 63 раза (рис. 8, *б*) видно, что структура поверхности после обработки стала однородной. Раковины отсутствуют. Однако видны перпендикулярные риски.

При увеличении в 125 раз (рис. 8, *в*) видно, что структура шероховатости проявляется более отчетливо. Она представлена комплексом рисок двух типов. Первый тип рисок имеет ширину 1…5 мкм и глубину 1…3 мкм. Второй тип рисок имеет ширину 5…15 мкм и глубину 3…8 мкм. Протяженность рисок обоих типов от 100 мкм. На обработанной поверхности не обнаружены микровыступы различных включений или следы шаржирования абразивным зерном.

Состояние поверхности образца после 30 циклов АЭО приведено на рис. 9.

а *б*

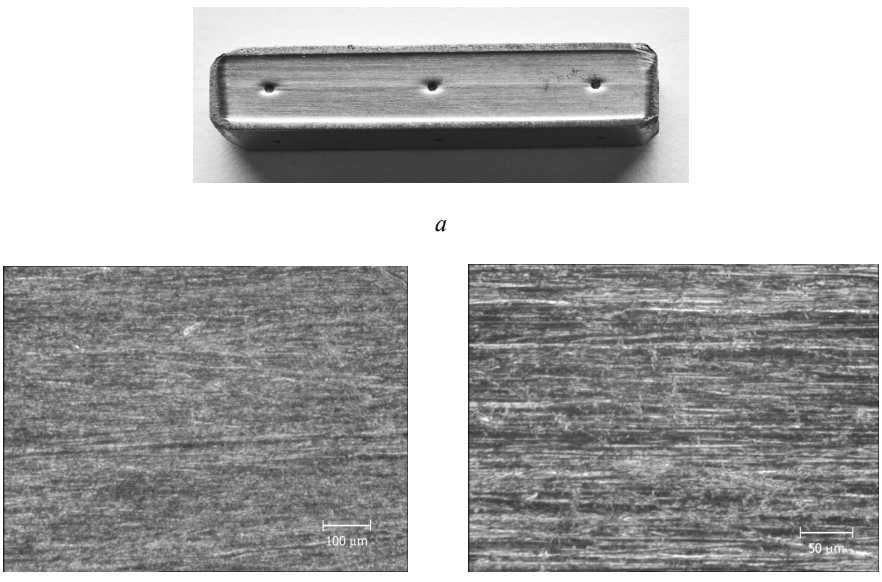
Рис. 7. Исходное состояние поверхности образца перед АЭО:
а – образец; *б* – увеличение в 63 раза



а

б *в*

Рис. 8. Состояние поверхности образца после 15 циклов АЭО:
а – образец; *б* – увеличение в 63 раза; *в* – увеличение в 125 раз



а

б *в*

Рис. 9. Состояние поверхности образца после 30 циклов АЭО:
а – образец; *б* – увеличение в 63 раза; *в* – увеличение в 125 раз

На образце (рис. 9, *а*) шероховатость снова претерпела изменения. Измеренная величина шероховатости Ra ≈ 0,22 мкм. При увеличении в 63 раза (рис. 9, *б*) видно, что структура шероховатости также представлена комплексом рисок двух типов. Однако протяженность рисок второго типа существенно уменьшилась. Это заметно при рассмотрении изображения образца с увеличением в 125 раз (рис. 9, *в*). Протяженность рисок первого типа осталась более 100 мкм. Протяженность рисок второго типа составила 20…50 мкм.

Перпендикулярные риски не наблюдаются. Видны микродефекты материала основного слоя металла, выраженные в виде нитевидных включений. Эти включения наблюдаются в центре фотографий (рис. 9, *в*). На обработанной поверхности не обнаружены следы шаржирования АЗ.

Использование выравнивающего устройства при обработке конусных каналов обеспечило равномерную шероховатость обработанной поверхности за счет изменения характера течения, т. е. перехода от течения в местном сопротивлении (конусе) к течению в кольцевой щели с постоянным сечением.

Абразивно-экструзионной обработкой с применением выравнивающего устройства позволило обеспечить равномерную шероховатость в каналах с переменной формой поперечного сечения. Ограничением по величине шероховатости и числу используемых циклов АЭО является допуск на финишную обработку.

В результате исследований процесса АЭО каналов с переменной формой сечения была подана заявка на патент Российской Федерации «Способ абразивно-экструзионной обработки канала, выполненного в форме цилиндра переходящего в конус».

Библиографические ссылки

1. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. Вып. 7. 2005. С. 96–100

2. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. Вып. 11. 2006. С. 64–68

3. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. пед. ун-та : сб. науч. тр. ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.

4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсова ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.

5. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков и др. // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (25). 2009. С. 138–145

6. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, М. А. Лубнин, Е. Б. Пшенко // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (25). 2009. С. 134–138.

V. A. Levko, P. A. Snetkov, E. B. Pshenko

RESEARCH OF ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESS CHANNELS WITH VARIABLE CROSS SECTION AREA

The medium flow investigations in the annular gap have been completed. The degree influences of cross-sectional area of the slit and the medium for the processing parameters was found. The recommendations on the use of leveling devices developed.

Keywords: abrasive flow machining, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.

© Левко В. А., Снетков П. А., Пшенко Е. Б., 2011

УДК 544.18

З. И. Попов, А. С. Федоров, А. А. Кузубов, Т. А. Кожевникова

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ПРИМЕСИ НА СКОРОСТЬ ДИФФУЗИИ ЛИТИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ*

Квантово-химическим методом DFT исследовано влияние атомов примесей (Al, B, C, Ge, P) на скорость диффузии лития в кристаллическом кремнии. Для этого произведен расчет величин потенциальных барьеров для переходов атома лития между потенциальными минимумами вблизи атомов примеси. Показано, что наличие атомов Al и Ge вблизи атома лития снижает высоту энергии перехода на 0,02–0,07 эВ, а присутствие атомов углерода или бора увеличивает энергию перехода на 0,14–0,17 эВ. При этом атомы фосфора не вносят существенного вклада в величину энергии перехода. Вычисленные коэффициенты диффузии показывают, что внесение примесных атомов Al и Ge в кремний ускоряет диффузию лития в ~4 раза при T = 300 K.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, кремний, литий, первопринципные расчеты, диффузия.

Развитие литий-ионных аккумуляторов в настоящее время является одной из самых актуальных задач в области источников тока ввиду их перспективности, широкого использования в электронных устройствах и даже в автомобилестроении ближайшего будущего. По сравнению с другими перезаряжаемыми батареями, такими как кислотно-свинцовые, никель кадмиевые, и никель-металл гидридные, литий-йонные батареи обладают большим удельным зарядом, рабочим напряжением и меньшим током саморазряда. На сегодняшний день основным материалом анодов современных батарей является графит, который обладает адсорбционной емкостью по литию 372 мА·ч/г, а также материалы на его основе. При внедрении ионы лития слегка раздвигают слои углеродной матрицы и располагаются между ними, образуя интеркалаты. Благодаря слабости Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий между слоями sp2-гибридизированного углерода, удельный объем углеродных материалов в процессе интеркаляции-деинтеркаляции ионов лития меняется незначительно, что является положительной чертой данных материалов. К сожалению, в таких материалах происходит значительный перенос электрического заряда с атомов лития на слои графита, что ведет к существенному отталкиванию ионов лития. Это приводит к тому, что максимальное содержание лития в графите соответствует фазе LiC_6, соответствующей вышеупомянутой адсорбционной емкости. Однако уже известно, что теоретическая емкость для батарей с кристаллическим кремниевым анодом может составить величину в 10 раз большую, чем для углеродных материалов [1], поэтому материалы на основе кремния сейчас широко изучаются как анодный материал для следующего поколения литий-йонных батарей [2–5]. Основной проблемой для широкого применения кремния в таких батареях является огромное увеличение объема кристаллической решетки кремния при его интеркалировании литием (~ 300 %), что приводит к быстрой деградации материала и малому количеству циклов сорбция-десорбция [6]. Одной из возможностей обойти данную проблему является использование наностуктур из кремния (наноусы и наночастицы), которые могут эффективно выращиваться, например, из газовой фазы методом CVD и др. В работах [7; 8] было убедительно продемонстрировано, что экспериментальные образцы с использованием кремниевых наноусов обладают в ~ 3 раза большими абсорбционными свойствами по сравнению с лучшими углеродными наноматериалами. Содержание лития в кремниевых наноусах и покрывающем их аморфном кремнии доходило до состава $Li_{15}Si_4$, причем кулоновская эффективность составляла ~ 90 % после 100 циклов зарядки. При этом именно использование наноусов, растущих в виде «леса» с выделенным направлением роста, позволило добиться малой деградации материала при значительном количестве циклов зарядка-разрядка. Малая деградация материала объяснялась тем, что значительные промежутки между отдельными наноусами (диаметром ~ 50 нм) не мешали «разбуханию» материала уса, внешняя оболочка которого за счет высокой скорости роста состояла из аморфного кремния, составлявшего в общей массе уса ~ 99 %. Тонкая кристаллическая сердцевина уса обеспечивала ему необходимую прочность и гибкость, а аморфное покрытие позволяло абсорбировать литий без разрушения структуры даже при большом разбухании решетки.

В недавних экспериментальных исследованиях было показано, что кристаллический кремний трансформируется в аморфный в процессе интеркаляции литием [9–13]. Результаты дифракции рентгеновский лучей (XDR) кристаллической фазы кремния максимально насыщенной литием при комнатной температуре, показали, что состав этой фазы не $Li_{21}Si_5$, как предполагалось ранее, а $Li_{15}Si_4$. Теоретическая адсорбционная емкость этой фазы равна 3579 мА·ч/г, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными результатами. При этом известно, что фазовая диаграмма систем Si–Li содержит достаточно большое количество кристаллических фаз [14; 15]. Известны фазы $Li_{21}Si_5$ [16], $Li_{13}Si_4$, $Li_{14}Si_6$ [17], $Li_{12}Si_7$ [18] и LiSi [19; 20], однако они не возникают в процессе электрохимической интеркаляции/деинтеркаляции лития в кристаллический кремний [9–11].

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2010–2011 гг. (П138).

Данные термодинамически стабильной фазы Si–Li обычно получаются в синтезе при высоких температурах (~ 700 К). Фазы, полученные электрохимическим методом и стабильные при комнатной температуре, предположительно являются аморфными сплавами чистого кремния и фазы кристаллического $Li_{15}Si_4$ [21].

Одновременно с изучением системы Si–Li существуют экспериментальные работы, в которых проводилось изучение диффузии лития в твердых растворах Ge–Si [22]. Авторами было показано, что допирование кремния атомами германия приводит к увеличению скорости диффузии. Таким образом, допированные системы представляют интерес для дальнейших исследований. Их теоретическое исследование необходимо для лучшего понимания процесса сорбции в них лития и преодоления проблемы деградации материала в процессе циклической перезарядки. Поэтому целью данной работы являлось теоретическое исследование влияния атомов примесей на скорость диффузии лития в кристаллическом кремнии, которая в основном определялась величиной энергетического барьера для перехода атома лития между ближайшими минимумами энергии.

Все расчеты в работе проводились в рамках формализма функционала плотности (DFT) [23] с градиентными поправками Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) [24] с использованием лицензионного пакета VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) [25–28]. Данная программа для проведения ab-initio расчетов использует метод псевдопотенциала и разложение волновых функций по базису плоских волн. Для эффективного уменьшения количества базисных функций и увеличения скорости расчетов в программе для всех атомов использовались псевдопотенциалы Вандербильта (Vanderbilt ultrasoft pseudopotential) [29] с энергией обрезания E_{cutoff} = 240 эВ. Для выбора оптимальных параметров расчета и точности интегрирования по первой зоне Бриллюэна был использован набор к-точек, сгенерированный с помощью метода Монхорста-Пака [30] на равномерной сетке 3X3X3, так как было обнаружено, что увеличение числа к-точек не приводит к увеличению точности расчета, но значительно увеличивает время расчета.

В первую очередь была оптимизирована геометрическая структура ячейки кремния в виде куба, включающая 64 атома и 1 атом лития, который располагался в потенциальном минимуме энергии – тетраэдрической поре. При проведении оптимизации геометрии координаты всех атомов в суперячейке варьировались с помощью метода сопряженных градиентов, используя вычисление сил, действующих на атомы. Оптимизация геометрии проводилась до тех пор, пока силы, действующие на каждый атом, не становились менее 0,05 эВ/Å.

Далее были рассчитаны высоты потенциальных барьеров (переходные состояния) для прыжков атомов лития. Данные расчеты были выполнены методом эластичной упругой ленты (NEB) [31]. Для этого были проведены оптимизации двух систем, где атом лития последовательно находился в соседних тетраэдрических порах (потенциальных минимумах), и после этого найдена траектория движения атома лития (путь реакции) при переходе из одной поры в соседнюю. При этом были вычислены потенциальный профиль и величина барьера перехода атома лития через седловую точку потенциального профиля.

Расчет коэффициента диффузии проводили при помощи стандартного уравнения

$$D = \frac{1}{2Z}\nu a^2, \qquad (1)$$

где a^2 – квадрат длины прыжка атома лития между минимумами; ν – частота его перескоков, которая в данном случае была получена из обобщенного уравнения Веньярда [32], учитывающего энергию нулевых колебаний. Данное уравнение позволяет рассчитывать частоту ν перескока атома через потенциальный барьер:

$$\nu = Ae^{-\frac{E_{barrier}}{kT}}, \qquad (2)$$

где A – предэкспоненциальный фактор, определяемый следующим образом:

$$A = \frac{kT}{\hbar}\frac{\prod_{i=1}^{3N-3}\left(1-e^{-\frac{\hbar\nu_i}{kT}}\right)}{\prod_{i=1}^{3N-4}\left(1-e^{-\frac{\hbar\nu'_i}{kT}}\right)}, \qquad (3)$$

где T – температура; ν_i и ν'_i – частоты всех собственных колебаний системы для атома лития в локальном минимуме и седловой точке соответственно. При этом в положении седловой точки атом лития находится в максимуме энергетического барьера между двумя локальными минимумами – центрами тетраэдрических пор кремния. В данной работе, ввиду большого количества атомов в системе, частоты колебаний были рассчитаны для атома лития и его ближайшего окружения, включающего первую координационную сферу начального и конечного положения (9 атомов). Данное приближение было нами успешно использовано ранее [33].

Рассчитанное значение коэффициента диффузии лития в кристаллическом кремнии $D = 3\cdot10^{-3}\exp(-0{,}605 \times \times [\text{eV}] / kT)$ неплохо согласуется с полученным экспериментально $D = 2{,}5\cdot10^{-3}\exp(-0{,}655[\text{eV}] / kT)$ в работах [34; 35].

Далее было исследовано влияние атомов примесей (Al, B, C, Ge, P) на высоты потенциальных барьеров при движении атома лития около близкорасположенного атома примеси. На рис. 1 представлены энергетические профили реакции перехода атома лития между тетраэдрическими пустотами вблизи этих примесей. При этом атом примеси располагается поперечно и принадлежит одному из тетраэдров, поэтому начальная и конечная энергия для перехода атома лития неэквивалентны. Из графика видно, что величина барьера прямого и обратного перехода лития различ-

на за счет разной энергии систем в начальном и конечном положениях.

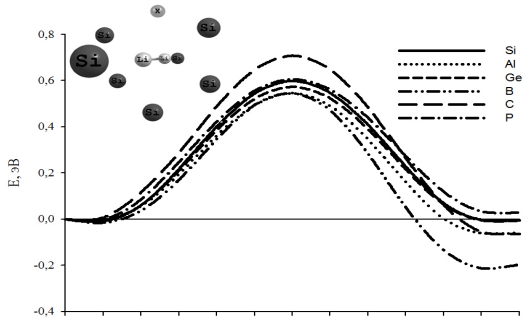


Рис. 1. Профиль потенциального рельефа для перехода атома лития между ближайшими минимумами в структуре XSi$_{63}$Li, X = (Al, B, C, Ge, P, Si). Атом примеси находится перпендикулярно к направлению прыжка

Для кристаллической структуры кремния без примеси энергии перехода атома лития во всех направлениях: $\Delta E_{\text{пр}} = \Delta E_{\text{обр}} = 0{,}605$ эВ. Для дальнейшего рассмотрения в качестве примеси были выбраны атомы Al и Ge, так как для них величины барьера были минимальны: барьер для прямого перехода атома лития с примесью алюминия составил $\Delta E_{\text{пр}}(\text{Al}) = 0{,}546$ эВ, а обратный – $\Delta E_{\text{обр}}(\text{Al}) = 0{,}605$ эВ. В присутствии примеси германия барьеры равнялись $\Delta E_{\text{пр}}(\text{Ge}) = 0{,}573$ эВ и $\Delta E_{\text{обр}}(\text{Ge}) = 0{,}580$ эВ. Наличие атомов фосфора не приводило к снижению энергии барьера перехода, а в случае B и C барьеры значительно увеличивались (на 0,14–0,17 эВ).

Далее было исследовано влияние на величину барьера для перехода лития двух близкорасположенных атомов примесей. Два атома примеси располагались в поперечном положении к атому лития напротив друг друга. В данном случае начальное и конечное состояния системы были эквивалентны по энергии, поэтому профиль потенциального рельефа перехода атома Li был симметричным (рис. 2).

В работе также было исследовано влияние на величину барьера перехода близкорасположенных атомов примеси, которые находились вдоль направления перемещения атома лития (рис. 3).

При этом данный барьер также соединяет неэквивалентные положения в минимумах. Однако при использовании в качестве примеси атома Ge начальное и конечное состояния отличаются на 0,02 эВ. Такое незначительное изменение можно объяснить тем, что Ge, как и Si, имеют схожую электронную конфигурацию и одинаковую алмазоподобную решетку. Только параметр решетки германия (a = 5,66 Å) больше, чем параметр для кремния (a = 5,43 Å). Только примесь в виде атома Al в данном положении значительно увеличивает энергетический барьер.

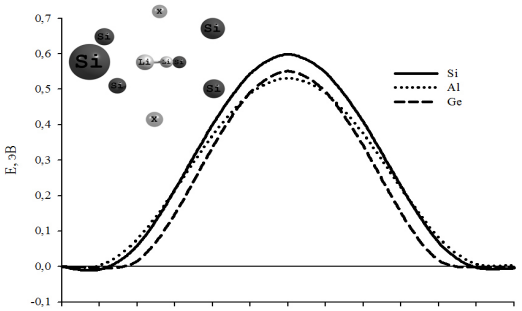


Рис. 2. Профиль потенциального рельефа для перехода атома лития между ближайшими минимумами в структуре X_2Si$_{62}$Li, X = (Al, Ge, Si). Атомы примеси находятся перпендикулярно к направлению прыжка

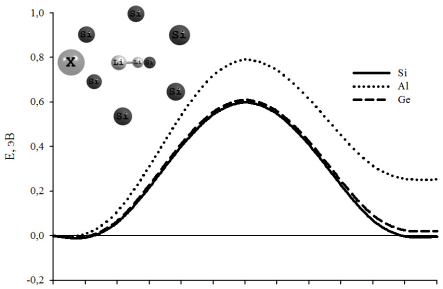


Рис. 3. Профиль потенциального рельефа для движения атома лития между ближайшими минимумами в структуре XSi$_{63}$Li, X = (Al, Ge, Si). Атом примеси находится в продольном положении к направлению прыжка

В таблице представлены значения высот потенциальных барьеров перехода атома лития и коэффициенты диффузии в зависимости от типа и положения атомов примеси.

Высота потенциального барьера и коэффициент диффузии лития

Атом примеси	Положение атома примеси	Высота потенциального барьера, эВ	Коэффициент диффузии при T = 300 K, см^2/с
Al	Поперечное	0,605	$1{,}4\cdot10^{-13}$
	Продольное	0,790	$1{,}5\cdot10^{-16}$
	Поперечное (2 атома)	0,532	$2{,}6\cdot10^{-12}$
Ge	Поперечное	0,580	$4{,}1\cdot10^{-13}$
	Продольное	0,610	$1{,}3\cdot10^{-13}$
	Поперечное (2 атома)	0,553	$1{,}5\cdot10^{-12}$
B	Поперечное	0,743	$7{,}7\cdot10^{-16}$
C	Поперечное	0,772	$3{,}6\cdot10^{-16}$
P	Поперечное	0,606	$1{,}5\cdot10^{-13}$
Чистый Si	–	0,605	$1{,}7\cdot10^{-13}$

Выполненные квантово-химические расчеты показывают, что коэффициенты диффузии лития в кристаллическом кремнии могут изменяться под влиянием близкорасположенных атомов примесей. Для ускорения диффузии лития могут применяться добавки в виде алюминия и германия. Внесение этих атомов в кремний ускоряет диффузию лития в ~ 4 раза при T = 300 К. При этом показано, что увеличение концентрации примесей, т. е. возможность существования двух атомов примеси в окрестности атома лития, существенно увеличивает этот эффект.

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (г. Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), а также компьютерному центру Сибирского федерального университета (г. Красноярск) за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых и были произведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Kasavajjula U., Wang C. S., Appleby A. J. Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells // J. Power Sources. Vol. 163. 2007. P. 1003.

2. Yang J., Winter M., Besenhard J. O. Small particle size multiphase Li-alloy anodes for lithium-ionbatteries // Solid State Ionics. Vol. 90. 1996. P. 281.

3. Huggins R. A. Lithium alloy negative electrodes formed from convertible oxides // Solid State Ionics. Vol. 113–115. 1998. P. 57.

4. Winter M., Besenhard J. O. Electrochemical lithiation of tin and tin-based intermetallics and composites // Electrochim. Acta. Vol. 45. 1999. P. 31.

5. Huggins R. A. Lithium alloy negative electrodes // J. Power Sources. Vol. 81–82. 1999. P. 13.

6. Lithium Batteries Science and Technology : ed. by G.-A. Nazri and G. Pistoia / Kluwer Academic. N. Y., 2004. P. 113.

7. Crystalline-Amorphous Core-Shell Silicon Nanowires for High Capacity and High Current Battery Electrodes / Cui Li-Feng, R. Ruffo, C. K. Chan et al. // NanoLetters. Vol. 9 (1). 2009. P. 491.

8. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires / C. K. Chan, H. Peng, Liu Gao et al. // Nature nanotechnology. Vol. 3. 2008. P. 31.

9. The crystal structural evolution of nano-Si anode caused by lithium insertion and extraction at room temperature / H. Li, X. Huang, L. Chen et al. // Solid State Ionics. Vol. 135. 2000. P. 181.

10. Maranchi J. P., Hepp A. F., Kumta P. N. High Capacity, Reversible Silicon Thin-Film Anodes for Lithium-Ion Batteries // Electrochem. Solid-State Lett. Vol. 6. 2003. P. A198.

11. Obrovac M. N., Christensen L. Structural Changes in Silicon Anodes during Lithium Insertion/Extraction // Electrochem. Solid-State Lett. Vol. 7. 2004. P. A93.

12. Electrochemically-driven solid-state amorphization in lithium–metal anodes / P. Limthongkul, Y. I. Jang, N. J. Dudney et al. // J. Power Sources. Vol. 119–121. 2003. P. 604.

13. Electrochemically-driven solid-state amorphization in lithium-silicon alloys and implications for lithium storage / P. Limthongkul, Y. I. Jang, N. J. Dudney et al. // Acta Mater. Vol. 51. 2003. P. 1103.

14. Wen C. J., Huggins R. A. Chemical diffusion in intermediate phases in the lithium-silicon system // J. Solid State Chem. Vol. 37. 1981. P. 271.

15. Marel C. V. D., Vinke G. J. B., Lugt W. V. D. The phase diagram of the system lithium-silicon // Solid State Commun. Vol. 54. 1985. P. 917.

16. Nesper R., Schnering H. G. Li_21Si_5, a Zintl phase as well as a Hume-Rothery phase // J. Solid State Chem. Vol. 70. 1987. P. 48.

17. Structure and properties of $Li14Si_6$/Li/2.33/Si/, the violet phase in the lithium-silicon system / H.-G. V. Schnering, R. Nesper, J. Curda, K.-F. Tebbe // Z. Metallkunde. Vol. 71. 1980. P. 357.

18. $Li_{12}Si_7$, a Compound Having a Trigonal Planar Si_4 Cluster and Planar Si_5 Rings / H. G. Schnering, R. Nesper, J. Curda et al. // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. Vol. 19. 1980. P. 1033.

19. Evers J., Oehlinger G., Sextl G. High-Pressure Synthesis of LiSi: Three-Dimensional Network of Three-Bonded Si-Ions // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. Vol. 32. 1993. P. 1442–1444.

20. Lithium monosilicide (LiSi), a low-dimensional silicon-based material prepared by high pressure synthesis: NMR and vibrational spectroscopy and electrical properties characterization / L. A. Stearns, J. Gryko, J. Diefenbacher et al. // J. Solid State Chem. Vol. 173. 2003. P. 251.

21. Crystal and electronic structure of $Li_{15}Si_4$ / Y. Kubota, M. Escano, H. Nakanishi, H. Kasai // J. Appl. Phys. Vol. 102. 2007.

22. Атабаев Н. Г., Матчанов Н. А., Бахранов Э. Н. Низкотемпературная диффузия лития в твердые растворы кремний-германий // ФТТ. 2001. Т. 43. С. 2040–2041.

23. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects // Phys. Rev. Vol. 140. 1965. P. 1133.

24. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple // Phys. Rev. Lett. Vol. 77. 1996. P. 3865–3868.

25. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Phys. Rev. B. Vol. 47. № 1. 1993. P. 558–561.

26. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium // Phys. Rev. B. Vol. 49. № 20. 1994. P. 14251– 4269.

27. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set // Computer Material Science. № 6. 1996. P. 15.

28. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. B. Vol. 54. 1996.

29. Vanderbilt D. Soft self-consistent pseudopotentials in generalized eigenvalue formalism // Phys. Rev. B. Vol. 41. 1990. P. 7892.

30. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // Phys. Rev. B. Vol. 13. 1976. P. 5188–5192.

31. Henkelman G., Jonsson H. Improved tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle points // J. Chem. Phys. Vol. 113. 2000. P. 9978–9985.

32. Vineyard G. V. Frequency factors and isotope effects in solid state rate processes // J. Phys. Chem. Solids. Vol. 3. 1957. P. 121–127.

33. Fedorov A. S., Sorokin P. B., Kuzubov A. A. Ab initio study of hydrogen chemical adsorption on platinum surface/carbon nanotube join system // Phys. Stat. Sol. B. Vol. 245. 2008. P. 1546–1551.

34. Pell E. M. Diffusion of Li in Si at High T and the Isotope Effect // Phys. Rev. Vol. 119. № 3. 1960. P. 1014–1021.

35. Pell E. M. Diffusion Rate of Li in Si at Low Temperature // Phys. Rev. Vol. 119. № 4. 1960. P. 1222–1225.

Z. I. Popov, A. S. Fedorov, A. A. Kuzubov, T. A. Kojevnikova

INFLUENCE OF IMPURITIES ON RATE OF DIFFUSION OF LITHIUM IN CRYSTAL SILICON

Influence of impurity atoms (Al, B, C, Ge, P) on rate of diffusion of lithium in crystal silicon is investigated by DFT calculations. For that potential barrier values for lithium atom passage between potential minimum nearby impurity atom have been calculated. It is shown the presence of Al or Ge atoms near lithium atom decreases the potential barrier value at 0,02–0,07 eV, but the presence of C or B atoms increases the barrier value at 0,14–0,17 eV. And the presence of P atoms does not influence on the potential barrier value. The calculated lithium diffusion rates show that injection of Al or Ge atoms into silicon increase the lithium diffusion rate at ~4 times at 300 K.

Keywords: lithium-ion accumulators, silicon, ab initio calculations, diffusion.

© Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Кожевникова Т. А., 2011

УДК 538.915

М. В. Сержантова, А. А. Кузубов, А. С. Федоров, Ф. Н. Томилин, П. О. Краснов

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ МОНОСЛОЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Работа посвящена исследованию влияния деформации на электронную структуру и свойства монослоя гексагонального нитрида бора, а также изучению поведения адатомов бора и азота на поверхности монослоя.

Ключевые слова: монослой гексагонального нитрида бора (h-BN), теория функционала плотности (DFT), электронная структура, вакансии, адатомы.

Существуют различные модификации нитрида бора: ромбоэдрический нитрид бора (g-BN), вюрцитный нитрид бора (ω-BN), гексагональный нитрид бора (h-BN), кубический нитрид бора (c-BN), турбостратный нитрид бора (t-BN). Кроме того, нитрид бора может существовать в виде нанотрубок и фуллеренов.

Гексагональный нитрид бора (h-BN) является наиболее стабильной формой нитрида бора и представляет собой слоистую структуру, подобную графиту [1; 2]. В спрессованном состоянии h-BN обладает полупроводниковыми свойствами, а присутствие примесей в соединении может вызывать люминесценцию. В связи с этим гексагональный нитрид бора интересен областью применения как в цветной металлургии, благодаря своей химической инертности и антиадгезионным свойствам по отношению к металлам и сплавам, так и в полупроводниковой промышленности, благодаря широкой запрещенной зоне.

Подобно углероду, соединение h-BN существует в виде отдельных плоскостей и получило название «белый графен». Авторами статьи [3] с помощью химического осаждения из газовой фазы были синтезированы пленки h-BN (от 2 до 5 атомных слоев), и смоделировано поведение плоского модуля упругости E^{2D} монослоя h-BN с концентрацией вакансий 1–10 %. Li Song и установлено [3], что значение E^{2D} уменьшается линейно с увеличением концентрации вакансий со значения 292,1 Н/м (для бездефектного монослоя h-BN) до 115,4 Н/м (10 % вакансий). Однако в настоящее время невозможно провести оценку реальной концентрации вакансий из-за того, что отсутствует информация об их стабильности. Кроме того, монослой h-BN при выращивании располагается на подложке из другого материала, что может приводить к деформации решетки монослоя. Также на концентрацию вакансий существенно влияет возможность их

рекомбинации с адатомами бора или азота, находящимися в газовой фазе. В этом случае важным фактором будет являться скорость перемещения адатомов по поверхности монослоя.

Поскольку присутствие вакансии указывает и на существование в системе оборванных связей, это может приводить не только к изменению прочности материала, но и к появлению в нем магнитного момента и изменению его электронного строения.

Тонкие пленки h-BN, наряду с графеном, рассматриваются как новые материалы с потенциальным использованием в сенсорной и электронной промышленности [4–6]. Электрические, тепловые, химические и механические свойства таких соединений сильно зависят от их атомной структуры. Таким образом, исследование стабильности в атомных масштабах, а также динамики вакансий и адатомов в подобных системах имеет решающее значение для прогнозирования их свойств и определения области применения. Поэтому наряду с экспериментальными методами изучения целесообразно использование расчетных методов (дающих хорошее совпадение с экспериментальными значениями) [7].

В настоящей работе проведено теоретическое исследование одновременного влияния вакансий и деформации на свойства h-BN. Для этого производился расчет энергии вакансий монослоя h-BN без деформации и в присутствии одноосной деформации (2 и 4 %), а также исследовались параметры миграции адатомов бора и азота по его поверхности. Изучалось влияние вакансий на электронное строение и магнитные свойства монослоя h-BN.

Объекты и методы исследования. Расчеты проводились в рамках формализма функционала плотности (DFT) [8] с градиентными поправками (PBE) с использованием пакета VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) [9–11]. В ходе вычислений применялся псевдопотенциал Вандербильта (Vanderbilt ultrasoft pseudopotential) [12]. Для исследования влияния вакансий на электронное строение и магнитные свойства, а также воздействие напряжений в системе на структуру с вакансией был смоделирован монослой h-BN в виде суперячейки, содержащей 5 × 3 × 1 прямоугольных ячеек (60 атомов; 12,3 × 11,2 Å). Для расчета энергии вакансий монослоя h-BN без деформации и в присутствии одноосной деформации (2 и 4 %), а также параметров миграции адатомов бора и азота по его поверхности был смоделирован монослой h-BN в виде суперячейки, содержащей 5 × 5 × 1 прямоугольных ячеек (100 атомов; 11,2 × 18,1 Å) (рис. 1). Подобные параметры были выбраны, чтобы исключить взаимодействие исследуемых дефектов, расположенных в различных суперячейках. Программа, в которой выполнялись расчеты, работает с использованием периодических условий, вследствие этого, для моделирования монослоя по нормали к его плоскости был задан вакуумный промежуток (15 Å). Значение вакуумного промежутка подбиралось исходя из предположения, что на данном расстоянии слои h-BN, находящиеся в соседних суперячейках, не будут оказывать влияния друг на друга. Обратное пространство в первой зоне Брюллюэна [13] автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста-Пака [14], количество k-точек вдоль каждого из направлений составляло 2 × 2 × 1. При расчетах плотности состояния количество k-точек составляло 6 × 6 × 1. Все расчеты в работе проводились с максимальным значением энергии плоских волн 348,1 eV. При оптимизации геометрии минимальное значение сил в работе составляло 0,01 eV / atom.

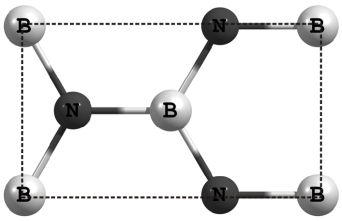


Рис. 1. Прямоугольная элементарная ячейка монослоя h-BN

Для изучения особенностей электронного строения монослоя h-BN были проведены расчеты зонной структуры и плотности состояния. Для нахождения неоднородности распределения спиновой плотности рассчитывались плотности состояний для подсистемы электронов с различным направлением спинового момента (спиновые плотности состояний). При этом были построены подобные спиновые плотности состояний, включающие вклады от всех атомов структуры (в дальнейшем – полные спиновые плотности состояний) и от отдельных атомов, представляющих наибольший интерес, с точки зрения локализации на них неспаренных электронов (парциальная спиновая плотность состояний).

Результаты и обсуждение. *Расчет электронной структуры монослоя h-BN с вакансиями.* В ходе анализа литературных данных было установлено, что ширина запрещенной зоны h-BN варьируется в пределах от 3 до 7,5 эВ [15; 16], однако экспериментального объяснения данному факту не найдено. Авторы статьи [17] после теоретического исследования с использованием теории функционала плотности (DFT) с приближением локальной плотности (LDA), плоских волн (PW) и псевдопотенциала (PP), пяти различных упаковок h-BN предположили, что расхождения в значении ширины щели экспериментальных структур объясняется тем, что h-BN является смесью различных упаковок, причем каждая с уникальной зонной структурой. При этом ширина запрещенной зоны варьируется от 3,2 до 4,03 эВ. Авторы статьи [3] провели измерения спектров поглощения пленками h-BN при комнатной температуре, исходя из полученных данных была рассчитана ширина запрещенной зоны, которая составила 5,56 эВ при длине волны λ = 223 нм для структур h-BN, содержащих от 2 до 5 слоев. Исследование электронной структуры монослоя h-BN, проведенное с использованием пакета программ SIESTA, теории функционала плотности (DFT) с обобщенным градиентным приближе-

нием (GGA) [18] показало, что ширина запрещенной зоны составляет 4,75 эВ.

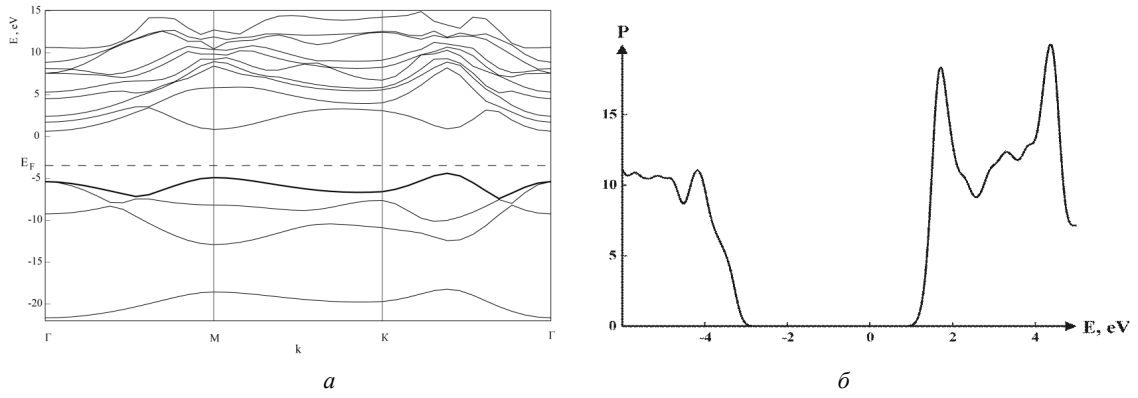
Помимо этого существуют разногласия в том, какой тип щели соответствует h-BN: прямая [4] или непрямая щель [16; 19]. Ранее было предложено, что h-BN является непрямым полупроводником, в то время как более поздние исследования показали, что h-BN имеет прямую запрещенную зону. Kenji Watanabe и др. [4] провели экспериментальное исследование чистого кристалла h-BN и измерили спектры люминесценции (cathodoluminescence) и спектры поглощения (fundamental absorption). Было установлено, что кристалл h-BN является прямым полупроводником с шириной запрещенной зоны 5,971 эВ.

Solozhenko V. L. и др. [16] провели исследования порошка h-BN с использованием лазерно-индуцированной флуоресценции (laser-induced fluorescence measurements). Анализ полученных спектров поглощения для гексагонального нитрида бора показал, что данное соединение является непрямозонным полупроводником с запрещенной зоной 4,02 эВ. Помимо этого, авторами статьи [19] было проведено теоретическое исследование h-BN с помощью FLAPW (full-potential self-consistent linearized augmented-plane-wave (FLAPW)) метода. Анализ полученных зонных структур показал, что h-BN является непрямозонным диэлектриком с шириной запрещенной зоны от 3,2 до 4,03 эВ. Подобное расхождение в данных скорее всего связано с отсутствием пленок h-BN высокого качества [20]. N. Ooi и др. [15] провели теоретическое исследование, основанное на теории функционала плотности (DFT) с различными приближениями (LDA, GGA) пяти возможных конфигураций слоев h-BN, и было установлено, что ширина запрещенной зоны варьируется от 3 до 3,5 эВ, в зависимости – от способа расположения слоев h-BN относительно друг друга (рис. 2).

В ходе проведенного нами исследования была рассчитана зонная структура монослоя h-BN без дефектов и деформации (рис. 2, *а*). Расчет производился с использованием программного пакета VASP, в рамках теории функционала плотности (DFT) с применением обобщенного градиентного приближение (GGA), функционала Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) и модифицированного обменного функционала Perdew-Wang 1991 (PW91). Было получено, что монослой h-BN является диэлектриком с непрямой запрещенной зоной, ширина которой составляет 4,56 эВ. Форма кривой распределения плотности электронных состояний, изображенная на рис. 2, *б*, для монослоя h-BN без дефектов и деформации подтверждает, что в области запрещенной зоны не наблюдается внедренных состояний.

Еще одним фактором, влияющим на разброс ширины запрещенной зоны, может быть наличие дефектов, которые в определенном количестве всегда присутствуют в кристалле. Наличие в структуре дефектов приводит к изменению стабильности структуры. Авторами статьи [3] экспериментально были получены пленки h-BN, содержащие от 2 до 5 слоев, и установлена зависимость жесткостных свойств соединения от концентрации вакансий. Поскольку присутствие вакансий указывает на существование в системе оборванных связей, это может приводить не только к изменению прочности материала, но и к появлению в нем магнитного момента и изменению его электронного строения. Получаемые в эксперименте подобные структуры располагаются на подложке. Взаимодействие материала с подложкой приводит к возникновению в нем напряжений, под действием которых происходит последующее изменение свойств. Одновременное влияние вакансий и деформаций на свойства монослоя h-BN в данный момент не исследовано.

С помощью вышеперечисленных методов была проведена качественная оценка ширины запрещенной зоны в структурах монослоя h-BN, h-BN с вакансией бора, вакансией азота и бивакансией (рис. 3). Вакансии в атомной структуре h-BN приводят к изменению электронной структуры соединения. В интервале от –3 до 1 эВ в случае дефекта бора появляется внутреннее состояние (внедренный уровень) в области запрещенной зоны, заполненное электронами (т. е. электроны находятся на оборванных связях азота, окружающих дефект). В случае дефекта азота наблюдается состояние, образованное вакантными орбиталями атома бора. При наличии в пластине вакансий обоих видов (бор, азот) наблюдается два внедренных частично заполненных уровня.



а *б*

Рис. 2. Зонная структура монослоя h-BN без дефектов и деформации (*а*) и полная плотность состояний вблизи уровня Ферми для монослоя h-BN без дефектов и деформации (*б*)

Для монослоя h-BN уровень Ферми равен 2,42 эВ, ширина запрещенной зоны – 4,56 эВ. При этом данное соединение является непрямозонным диэлектриком. Для монослоя h-BN с вакансией атома бора уровень Ферми равен 3,26 эВ, расстояние до внедренного уровня – 0,11 эВ. Для плоскости h-BN с дефектом азота уровень Ферми составил 0,44 эВ, расстояние до внедренного уровня – 2,68 эВ. Для плоскости h-BN с вакансиями бора и азота уровень Ферми – 3,16 эВ, расстояние до первого внедренного уровня – 0,55 эВ, до второго – 3,66 эВ.

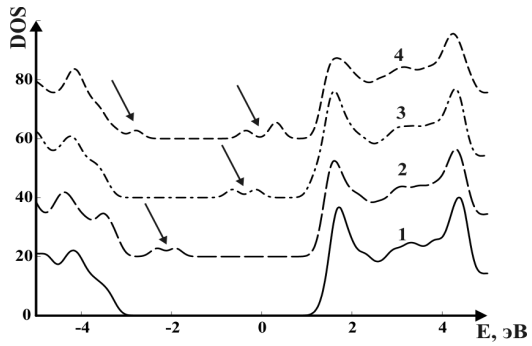


Рис. 3. Плотности состояний для монослоя h-BN без деформации (стрелками указаны внедренные состояния):
1 – монослой h-BN; 2 – монослой h-BN с вакансией бора;
3 – монослой h-BN с вакансией азота; 4 – монослой h-BN с бивакансией

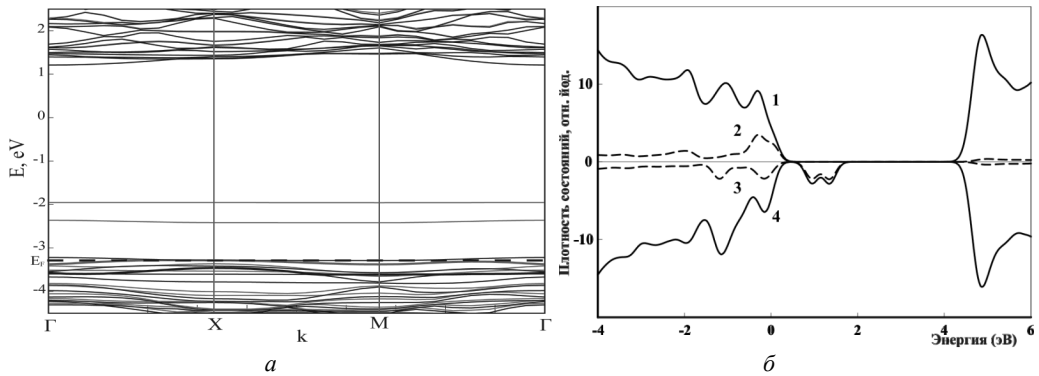
Известно, что вакансии приводят к изменению электронной плотности соединений и, как следствие, к изменению свойств, например, появлению в системе магнитного момента. Экспериментальные работы показывают, что спонтанной намагниченности в монослоях h-BN не существует. Тем не менее, S. Azevedo и др. [18] изучали в результате теоретических исследований, что в монослоях h-BN наблюдается спонтанная намагниченность в присутствии примеси замещения или при введении вакансий в структуру. Расчет спин-поляризованных состояний (DOS) показал, что для монослоев, содержащих вакансию бора или азота, или при замещении вакансии бора или азота атомом углерода наблюдается намагниченность.

В ходе проведенного исследования было установлено, что на появление магнитного момента в системе оказывает влияние не только наличие вакансий в структуре, но и деформация.

В случае вакансии бора магнитный момент в системе появляется при сжатии и растяжении на 2 и 4 %, а также без деформации (рис. 4). На рис. 4, *а* приведена зонная структура, соответствующая монослою h-BN с вакансией бора без деформации. Уровень Ферми пересекает верхнюю заполненную зону, что делает данное соединение проводником. В области запрещенной зоны наблюдаются два вакантных внедренных состояния. Это является следствием того, что электроны, находящиеся на оборванных связях делокализуются по поверхности монослоя. На рис. 4, *б* изображены полные и парциальные спиновые плотности состояний для данного случая. Пики, расположенные в области 1,3–1,8 эВ присутствуют в полных и парциальных спиновых плотностях состояний для электронов, что указывает на наличие в системе спиновой плотности и как следствие магнитного момента.

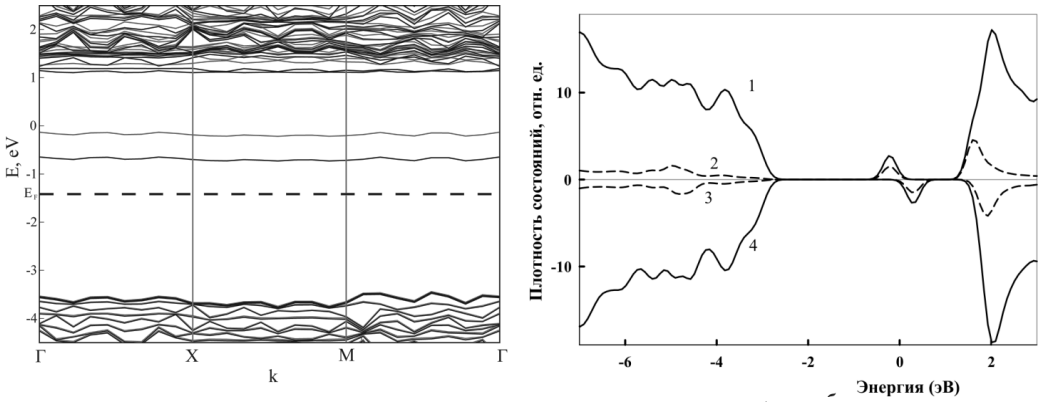
Для системы h-BN с дефектом азота внедренное состояние локализовано на вакантных орбиталях атомов бора во всех случаях (в присутствии деформации и без деформации) (рис. 5). Зонная структура для монослоя h-BN с вакансией азота без деформации изображена на рис. 5, *а*. Соединение является полупроводником. В области запрещенной зоны наблюдается два внедренных состояния, образованных электронами, которые локализованы на вакантных орбиталями атомов бора, окружающих дефект. Полные и парциальные плотности для данного случая приведены на рис. 5, *б*.

Для структуры h-BN с бивакансией магнитный момент появляется только в случае растяжения на 4 % (рис. 6). Зонная структура для монослоя h-BN с бивакансией приведена на рис. 6, *а*. Уровень Ферми смещен к валентной зоне. Соединение является полупроводником. В области запрещенной зоны наблюдается два внедренных состояния, обусловленных свободными орбиталями атомов, окружающих дефект. При этом в плотностях состояния наблюдаются парциальные вклады от ближайших атомов, которые окружают дефект (рис. 6, *б*).



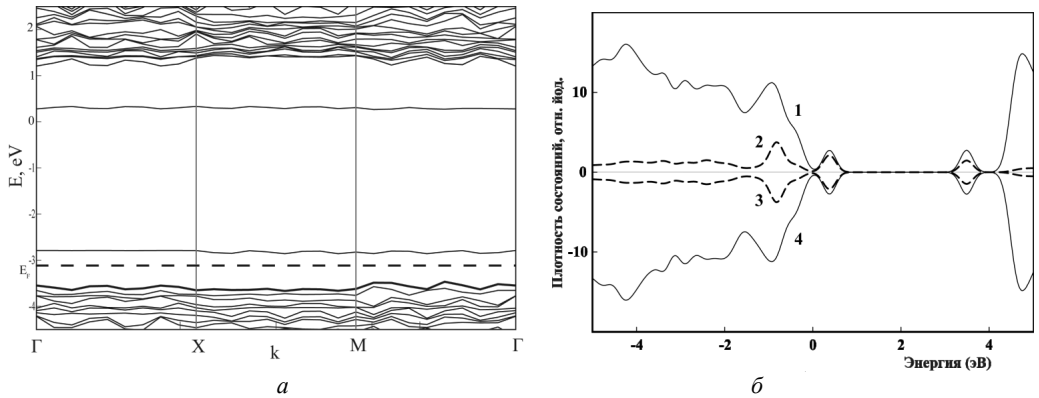
а *б*

Рис. 4. Зонная структура (*а*) и полная и парциальная плотности состояний (*б*) для монослоя h-BN с вакансией бора без деформации. На этом рисунке и далее 0 эВ соответствует уровню Ферми для полных и парциальных плотностей состояния:
1, 4 – полная спиновая плотность состояний со спином вверх и вниз, соответственно; 2, 3 – парциальная спиновая плотность состояний атомов азота, окружающих дефект со спином вверх и вниз, соответственно



а *б*

Рис. 5. Зонная структура (*а*) и полная и парциальная плотности состояний (*б*) для монослоя h-BN с вакансией азота без деформации:
1, 4 – полная спиновая плотность состояния со спином вверх и вниз, соответственно; 2, 3 – парциальная спиновая плотность состояния атомов бора, окружающих дефект со спином вверх и вниз, соответственно



а *б*

Рис. 6. Зонная структура (*а*) и полная и парциальная плотности состояний (*б*) для монослоя h-BN с бивакансией без деформации:
1, 4 – полная спиновая плотность состояния со спином вверх и вниз, соответственно; 2, 3 – парциальная спиновая плотность состояния атомов, окружающих бидефект со спином вверх и вниз, соответственно

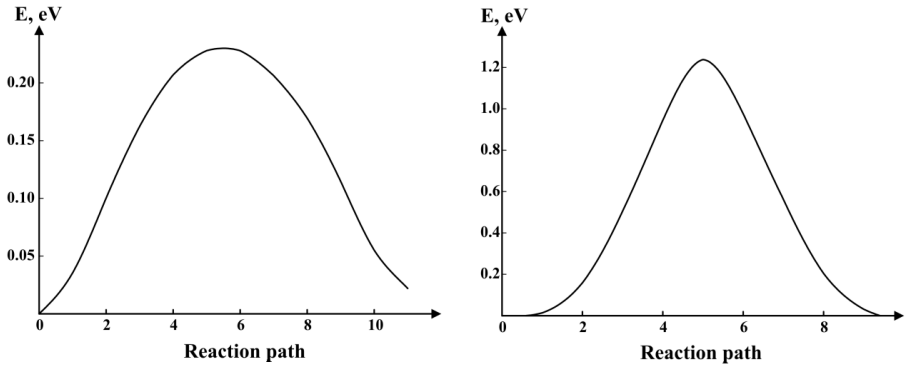
Анализ распределения спиновой плотности показал, что магнитный момент в системе появляется в случае вакансии бора или азота и не зависит от прилагаемой деформации. В случае монослоя h-BN с бивакансией магнитный момент появляется лишь при растяжении на 4 %.

Моделирование поведения адатомов на поверхности монослоя h-BN. В ранее опубликованной работе [21] была проведена оценка концентрации вакансий в монослое h-BN и установлено, что наиболее стабильными являются вакансии азота. Более того, на число вакансий будет влиять подвижность адатомов азота и бора на поверхности слоя и, как следствие, возможность их рекомбинации с вакансиями. Для оценки вероятности данных процессов в работе проводилось моделирование движения адатомов с целью расчета кинетических параметров перескока по поверхности монослоя h-BN.

Для этого был смоделирован процесс перехода адатома между его наиболее выгодными положениями. В результате расчета были получены энергетические профили миграции адатомов по поверхности монослоя h-BN (рис. 7).

Величина энергетического барьера миграции адатома бора составляет ~ 0,23 эВ (рис. 7, *а*), для адатома азота ~ 1,23 эВ (рис. 7, *б*). Такая малая величина барьера для адатома бора указывает на то, что данный тип адатомов будет достаточно быстро перемещаться по поверхности, в отличие от адатомов азота. Следовательно, выращивание монослоя h-BN методами, в которых существует возможность появления адатомов на поверхности (например, химическое осаждение из газовой фазы (CVD)), будет приводить к получению структуры, в которой возможно существование только вакансий азота.

Исследование электронной структуры монослоя h-BN с вакансиями показало, что в области запрещенной зоны возникает набор внедренных состояний, положение которых относительно других уровней меняется в зависимости от деформации структуры. Величина и направление деформации (сжатие или растяжение), влияет на характеристики магнитного момента системы. Таким образом, в результате исследований выявлена способность монослоя h-BN при наличии вакансий приобретать магнитный момент, величина которого определяется деформацией монослоя.



а *б*

Рис. 7. Энергетические барьеры перехода адатома бора (*а*) и адатома азота (*б*) по поверхности монослоя h-BN

Проведенные исследования показали, что с точки зрения термодинамики в монослое h-BN концентрация вакансий будет достаточно низкой, что не должно оказывать существенного влияния на свойства материала. В случае их образования будут превалировать вакансии атомов азота, как обладающие минимальной энергией образования. Кроме этого, концентрация вакансий бора будет уменьшаться, вследствие их рекомбинации с адатомами бора, которые могут достаточно свободно перемещаться по поверхности монослоя.

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (г. Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), а также Комплексу высокопроизводительных вычислений ИКИТ СФУ (г. Красноярск) за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых и были произведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Edgar J. H. Properties of group III nitrides. INSPEC. London, 1994.

2. Doni E., Pastory Parravicini G. IL NUOVO CIMENTO. LXIV. 1969. B. 1. 117.

3. Nano Lett / Li Song, Lijie Ci, Hao Lu et al. 2010. Vol. 10. 3209.

4. Watanabe K., Taniguchi T., Kanda H. Nature Mater. 2004. Vol. 3. 404–409.

5. IEEE Electron Device Letters / M. C. Lemme [et al.]. 2007. Vol. 28. 282.

6. Nat. Mater. / F. Schedin [et al.]. 2007. Vol. 6. 652.

7. Nag A., Raidongia K. K. P. S. S. Hembram. ACS Nano. 2010. Vol. 4. 1539.

8. Kohn W., Sham L. J. Phys. Rev. 1965. B 140. A1133.

9. Phys. Rev. / G. Kresse, J. Hafner et al. 1993. B 47. 558.

10. Phys. Rev. / G. Kresse, J. Hafner et al. 1993. B 48. 13115.

11. Phys. Rev. / G. Kresse, J. Hafner et al. 1994. B 49. 14251.

12. Vanderbilt. D. Phys. Rev. 1990. B bf 41. 7892.

13. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., 1978.

14. Monkhorst H. J., Pack J. D. Phys. Rev. 1976. B 13. 5188.

15. Mater. Sci. Eng. / N. Ooi, V. Rajan, J. Gottlieb et al. 2006. 14. 515.

16. J. Phys. Chem. Solids / V. L. Solozhenko, A. G. Lazarenko, J. P. Petitet et al. 2001. Vol. 62 (7). 1331-4.

17. Liu L., Feng Y. P., Shen Z. X. Phys. Rev. 2003. B 68. 104102–9.

18. Eur. Phys. J. / S. Azevedo, C. M. C. de Castilho. J. R. Kaschny et al. 2009. B 67. 507–512.

19. Phys. Rev. / A. Catellani, M. Posternak, A. Baldereschi et al. 1987. B 36 (11). 6105.

20. Nano Lett. / Y Shi., C. Hamsen, X. Jia et al. 2010. Vol. 10. P. 4134–4139.

21. Письма в ЖЭТФ / А. А. Кузубов [и др.]. 2011. № 93 (6). С. 368–371.

M. V. Serzhantova, A. A. Kuzubov, A. S. Fedorov, F. N. Tomilin, P. O. Krasnov

THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION ON THE ELECTRONIC STRUCTURE OF A HEXAGONAL BORON NITRIDE MONOLAYER

Work is devoted research of influence of deformation on electronic structure and properties of a monolayer hexagonal boron nitride, and also to behavior studying adatoms of boron and nitrogen on a monolayer surface.

Keywords: hexagonal boron nitride monolayer (h-BN), density functional theory (DFT), electronic structure, vacancies, adatoms.

© Сержантова М. В., Кузубов А. А., Федоров А. С., Томилин Ф. Н., Краснов П. О., 2011

УДК 621.81.004

А. В. Сутягин, Л. С. Малько, И. В. Трифанов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РОТАЦИОННЫМ ТОЧЕНИЕМ*

Показаны возможности и перспективы технологии ротационного точения наружных винтовых поверхностей деталей машин принудительно вращаемым многолезвийным инструментом.

Ключевые слова: ротационное точение, винтовая поверхность, многолезвийный инструмент.

Недостатками традиционных способов лезвийной обработки являются постоянные контактные взаимодействия рабочих поверхностей лезвия инструмента с обрабатываемым материалом заготовки в виде скольжения. В результате, тепловые и силовые нагрузки локализуются в малом объеме инструмента, что влияет на его режущую способность, стойкость инструмента и не позволяет интенсифицировать процесс резания, а также снижает качество обработки поверхности деталей машин [1].

В связи с этим целесообразна разработка прогрессивных способов лезвийной обработки материалов. Одним из таких способов является технология ротационного точения принудительно вращаемым многолезвийным инструментом. Кинематика формообразования этого способа характеризуется качением без скольжения центроиды инструмента в форме окружности по центроиде детали в форме прямой линии [2], при этом производящая образующая линия воспроизводится по методу огибания, а винтовая направляющая линия – по методу кинематического профилирования. При ротационном точении реализуются два принципа процесса обработки: традиционного резания в результате скольжения режущего клина инструмента по обрабатываемой поверхности и касательного резания при одновременном качении за счет вращения инструмента. Действие ротационного многолезвийного принудительно вращаемого инструмента является сложным в процессе лезвийной обработки деталей машин. Главное движение в процессе резания – это вращение обрабатываемой заготовки n. Многолезвийный инструмент при этом совершает движение подачи S за счет вращения и одновременного продольного перемещения. Глубина резания t устанавливается с учетом свойств обрабатываемого материала и профиля обрабатываемой поверхности. На рис. 1 приведена схема движений при образовании винтовой поверхности ротационным точением принудительно вращаемым многолезвийным инструментом.

Скорость вращения заготовки V_1 определяется по формуле

$$V_1 = \frac{\pi D n}{1000}, \qquad (1)$$

где D – диаметр заготовки; n – число оборотов.

Скорость вращения инструмента вокруг своей оси является результатом суммирования двух скоростей (V_2 и V_3). V_2 можно определить по выражению

$$V_2 = \frac{N}{Z_n} \cdot V_1, \qquad (2)$$

где N – число заходов винтовой поверхности; Z_n – число режущих элементов.

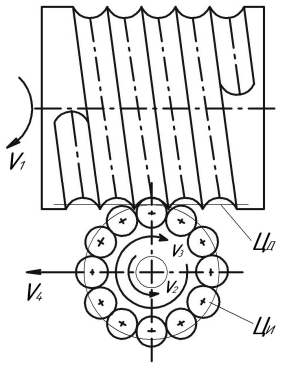


Рис. 1. Схема движений при образовании винтовой поверхности ротационным точением многолезвийным инструментом:
$Ц_Д$ – центроида детали; $Ц_И$ – центроида инструмента

Скорость вращения инструмента V_4, вызванная продольной подачей S инструмента на один оборот детали, рассчитывается по уравнению (в мм)

$$V_3 = \frac{S}{\pi d}, \qquad (3)$$

где d – диаметр центроиды инструмента.

Скорость продольного перемещения инструмента V_3:

$$V_3 = S. \qquad (4)$$

При вращении многолезвийного инструмента в процессе резания постоянно происходит обновление режущих элементов инструмента и реализуется процесс прерывистого резания. Стружка всегда образуется дробленая в результате подвода новых режущих элементов со стороны инструмента, при этом снижается интенсивность адгезии между обрабатываемым материалом и инструментом. С другой стороны обеспечивается безопасность технологического процесса.

*Работа выполнена при финансовой поддержке по договору № Б1.9.11.

Известно, что при традиционной лезвийной обработке металлов на передней поверхности резца может образовываться нарост. Нарост представляет собой деформированный слой металла и различные окисные пленки. Твердость нароста в 2–2,5 раза выше, чем обрабатываемый металл [1], что отрицательно влияет на процесс резания, стойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности.

Известно, что при изменении режимов и параметров лезвийной обработки при традиционной механической обработке при V = 10…40 м/мин отмечается рост силы резания, продольной усадки стружки и увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности (рис. 2). Это вызывает необходимость перехода в зону скоростных режимов резания (V = 80…140 м/мин) при механической обработке деталей машин. При скоростных режимах резания происходит срыв нароста с передней поверхности резца, в результате этого при постоянной подаче S снижается шероховатость обрабатываемой поверхности. Однако при этом может резко возрастать температура в зоне резания до 600 °С и выше, что ведет к быстрому износу инструмента за счет уменьшения твердости и предела прочности инструментального материала (рис. 3).

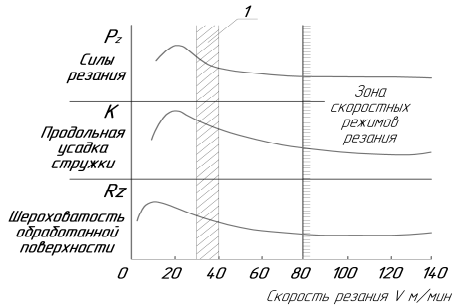


Рис. 2. Изменение силы резания, продольной усадки стружки и шероховатости обработанной поверхности в зависимости от скорости резания:
1 – зона рациональной скорости при ротационном точении инструментом с режущей частью из быстрорежущей стали

Стойкость резца можно определить по формуле [3]

$$T \geq \sqrt[1-n]{\frac{L}{A}}, \qquad (5)$$

где L – фактор обработки; A – постоянная для заданных условий обработки; n – показатель относительной стойкости ($n < 1$):

$$L = \pi dl/S, \qquad (6)$$

где l – длинна обрабатываемой детали; S – подача.

При постоянных факторах обработки стойкость резца можно повысить за счет благоприятного изменения условий обработки A, что хорошо реализуется при ротационном точении.

С другой стороны в зоне скоростных режимов обработки возрастают силы резания:

$$P = f(A,\ t,\ S,\ V,\ Kp), \qquad (7)$$

где V – скорость резания; Kp – экспериментальный поправочный коэффициент.

Рост температуры и силы резания, а также снижение прочностных и стойкостных характеристик режущего элемента инструмента при традиционном точении ограничивают повышение скорости резания и эффективность лезвийной обработки.

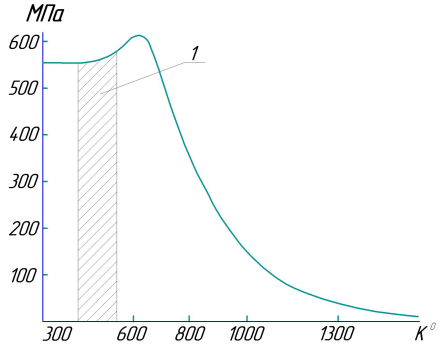


Рис. 3. Прочность стали в зависимости от температуры:
1 – зона температур при ротационном точении

При ротационном точении принудительно вращаемым многолезвийным инструментом происходит последовательное участие его режущих кромок в процессе резания [4]. Точка контакта режущего элемента инструмента с обрабатываемой заготовкой при резании постоянно обновляется [5] при этом температура в зоне резания не превышает 300 °С. Отсутствует интенсивная адгезия между обрабатываемым материалом и инструментом. В связи с этим в более чем в 20 раз возрастает стойкость инструмента, а производительность обработки – в 3–4 раза по сравнению с традиционной лезвийной обработкой [5].

Принудительное вращение многолезвийного инструмента обеспечивает лучшую шероховатость обработанной поверхности как при малых, так и больших скоростях резания (Ra ≤ 2,5 мкм). Установлено, что принудительно вращаемый многолезвийный инструмент способен устойчиво работать с малыми (и даже равными нулю) углами скрещивания оси режущего инструмента и вектора скорости главного движения резания, что снимает ряд геометрических ограничений, присущих свободно вращающимся резцам [4].

Процесс многолезвийной обработки принудительно вращаемым инструментом склонен к вибрации за счет изменения сечения срезаемого слоя припуска от реза к резу. В связи с этим необходимо создание шпиндельной головки с высокой крутильной жесткостью. До недавнего времени считалось, что рациональная обработка принудительно вращаемым многолезвийным инструментом связана с необходимостью создания громоздкого и конструктивно сложного оборудования. На кафедре управления качеством и сертификации СибГАУ была разработана и реализована кинематическая схема устройства для ротационного точения винтовых поверхностей, интегрированная с токарно-винторезным станком 1М65. Кинематическая схема устройства разработана на бездифференциальной основе [6]. Это позволило существен-

но упростить конструкцию, повысить жесткость кинематической цепи и обеспечить вращение многолезвийного инструмента в процессе обработки винтовой поверхности с необходимым крутящим моментом и жесткостью. Вращение заготовки и инструмента в процессе обработки детали должны быть кинематически связаны. В качестве органа настройки используется гитара сменных зубчатых колес. Исходя из характеристики винтовой поверхности обрабатываемой детали, числа режущих элементов инструмента и выбранной продольной подачи определяется передаточное отношение зубчатых колес гитары:

$$i_x = \frac{n}{K_x \cdot Z_u}\left(1 \pm \frac{S}{T}\right),$$

где n – число заходов винтовой поверхности; K_x – постоянный коэффициент, характеризующий кинематическую цепь станка; S – продольная подача; T – ход винтовой линии обрабатываемой детали [6].

Особенность разработанного и изготовленного опытного устройства для ротационного точения винтовых поверхностей с принудительно вращаемым многолезвийным инструментом – это его высокие технологические возможности (табл. 1), трансформируемость, что позволяет использовать технологию в условиях единичного, мелкосерийного и крупносерийного производства для обработки винтовых поверхностей. На рис. 4 показан процесс обработки винтовой поверхности: корпуса червячной фрезы m = 10 из стали 40Х (рис. 4, *а*), винтовой поверхности радиусного профиля (рис 4, *б*), который подтвердил преимущество ротационной обработки винтовой поверхности перед традиционным.

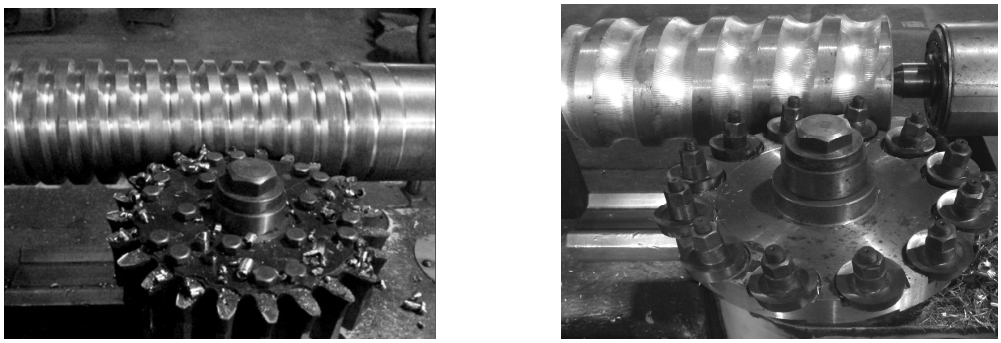
Таблица 1

Тактико-технические характеристики устройства для ротационного точения винтовых поверхностей интегрированного с токарно-винторезным станком 1М65

№ п/п	Параметры	Значение
1	Продольная подача	1,25 мм/об
2	Скорость резания	до 40 м/мин
3	Глубина резания	3 мм

Для ротационной обработки винтовых поверхностей радиусного профиля, а также винтовой поверхности червячной фрезы конвалютного типа модулем 10 мм по методике [6] были спроектированы и изготовлены многолезвийные инструменты с параметрами, представленными в табл. 2.

Для исследования процесса срезания припуска при формировании профиля винтовой поверхности была разработана геометрическая графоаналитическая модель. Основой разработки модели явилось использование уравнений циклоидальных и эвольвентных кривых для составления математического алгоритма формирования профиля винтовой поверхности с использованием математических библиотек пакета MATLAB.



а *б*

Рис. 4. Процесс обработки:
а – корпуса червячной фрезы m = 10 мм; *б* – винтовой поверхности радиусного профиля

Таблица 2

Параметры многолезвийных инструментов для ротационного точения винтовой поверхности

№ п/п	Параметры	Для радиусного профиля	Для конвалютного червяка
1	Наружный диаметр, мм	278	260
2	Число режущих элементов	12	24
3	Профиль режущей кромки	радиус r = 24 мм	эвольвента m = 10 мм
4	Материал режущей части	сталь быстрорежущая Р6М5	сталь быстрорежущая Р6М5
5	Вид конструкции инструмента	сборная	сборная
6	Марка материала корпуса	сталь 40Х	сталь 40Х
7	Масса, кг	16	19
8	Угол наклона режущих элементов	7°	4°39′

Разработанная модель позволяет провести численные эксперименты по установлению формы, размеров и сечения срезаемой стружки каждым режущим элементом многолезвийного инструмента, числа резов для формирования профиля винтовой поверхности в зависимости от продольной подачи и глубины резания, что позволяет научно обосновать назначение режимов обработки.

На рис. 5 показана визуализация результатов моделирования процесса генерации радиусного профиля винтовой поверхности ротационным точением с изменением одного из технологических факторов (продольной подачи инструмента). Ординаты базовой точки в зависимости от продольной подачи представлены в табл. 3. На рис. 6 показано влияние продольной подачи инструмента на максимальную толщину срезаемого припуска и число резов инструмента при удалении припуска и формировании профиля винтовой поверхности.

Визуальный анализ полученных результатов моделирования формирования профиля ВП с изменением одного из технологических факторов продольной подачи показал, что предложенная геометрическая графоаналитическая модель восприимчива к изменению факторов, влияющих на процесс формирования профиля винтовой поверхности ротационным точением многолезвийным инструментом и может быть использована для его исследования.

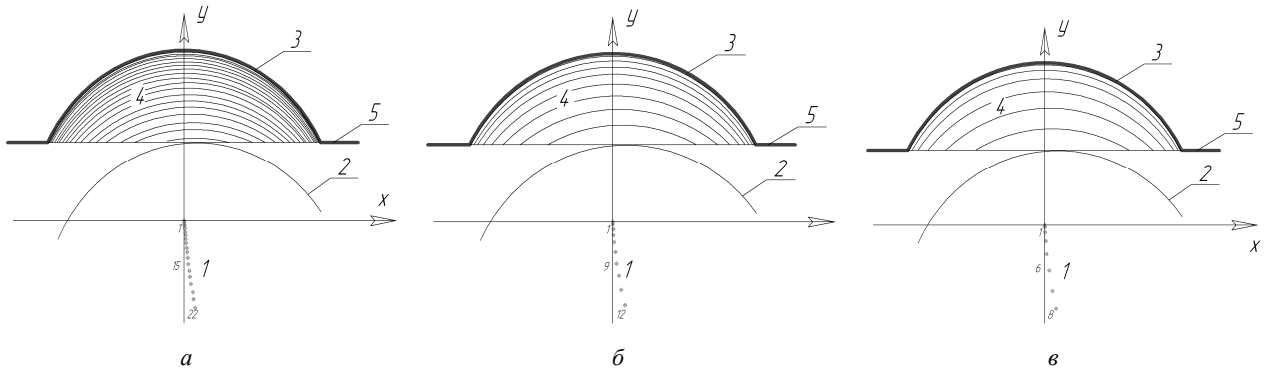


Рис. 5. Схемы генерации радиусного профиля ВП ротационным точением:
а – при подаче 3 мм; *б* – при подаче 6 мм; *в* – при подаче 9 мм; *1* – последовательные положения базовой точки; *2* – профиль режущего элемента инструмента; *3* – профиль винтовой поверхности; *4* – линии реза; *5* – наружный диаметр детали

Таблица 3

Значение ординат базовой точки

№ п/п	Рис. 5, *а*		Рис. 5, *б*		Рис. 5, *в*	
	Подача *S*, мм/об					
	3		6		9	
	x	*y*	*x*	*y*	*x*	*y*
1	0	0	0	0	0	0
2	0,006	–0,277	0,002	–0,123	0,001	–0,031
3	0,045	–1,105	0,013	–0,491	0,002	–0,123
4	0,153	–2,482	0,045	–1,105	0,006	–0,277
5	0,362	–4,403	0,107	–1,963	0,013	–0,491
6	0,705	–6,861	0,209	–3,063	0,026	–0,768
7	1,216	–9,845	0,362	–4,403	0,045	–1,105
8	1,926	–13,345	0,574	–5,982	0,072	–1,503
9			0,855	–7,797	0,107	–1,963
10			1,216	–9,845	0,153	–2,482
11			1,665	–12,122	0,209	–3,063
12			1,926	–13,345	0,279	–3,703
13					0,362	–4,403
14					0,460	–5,163
15					0,574	–5,982
16					0,705	–6,861
17					0,855	–7,797
18					1,025	–8,792
19					1,216	–9,845
20					1,429	–10,955
21					1,665	–12,122
22					1,926	–13,345

Технология лезвийной обработки ротационным точением была апробирована при обработке корпуса червячной фрезы, изготовленной из стали 40Х. Основные характеристики корпуса червячной фрезы, полученные после ротационной обработки многолезвийным принудительно вращаемым инструментом, представлены в табл. 4

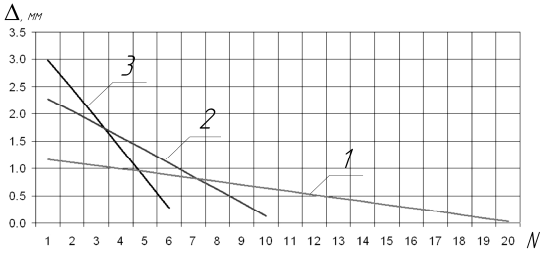


Рис. 6. Максимальная толщина стружки и количество резов в зависимости от продольной подачи:
Δ – толщина срезаемого слоя; *N* – номер срезаемого слоя;
1 – *S* = 3 мм/об; *2* – *S* = 6 мм/об; *3* – *S* = 9 мм/об

Стружкообразование в процессе лезвийной обработки играет существенную роль, так как характеризует процесс срезания припуска, вид образующейся стружки, деформацию в процессе резания. При обработке поверхности конвалютного типа была получена степень дробления стружки ω = 9, при обработке винтовой поверхности радиусного типа ω = 10, что обеспечивает безопасность технологического процесса и не требует создания специального устройства для стружкодробления.

Проведенные исследования позволили установить, что при механической обработке корпуса червячной фрезы температура в зоне резания не превышала 150 °С при сухом точении, соответственно это позволяет повысить стойкость инструмента более чем в 30 раз. Натурные испытания технологии ротационной обработки корпуса червячной фрезы принудительно вращаемым многолезвийным инструментом при подаче 1,25 мм/об показали эффективность разработанного устройства: оно в 7 раз превышает по подаче возможность серийно выпускаемого станка Е3-10А (допустимая подача 0,159 мм/об) и более чем в 3 раза устройства, работающего по методу обката (допустимая подача 0,4 мм/об).

Технология ротационного точения наружной винтовой поверхности деталей машин многолезвийным инструментом может применяться при обработке винтовой поверхности с последующей закалкой и шлифованием, а также на операциях предварительной обработки до закалки. Винтовые поверхности, не подвергающиеся закалке, обрабатываются как на предварительной так и на финишной операциях (табл. 5).

Анализ результатов проведенных исследований и натурных испытаний разработанного устройства и многолезвийного инструмента для ротационного точения винтовых поверхностей показал, что при этом способе обработки режущая кромка инструмента врезается постепенно в обрабатываемую поверхность и поэтому имеется возможность работать при более высоких режимах по сравнению с обработкой фасонными радиальными резцами.

Таблица 4

Основные характеристики корпуса червячной фрезы

№ п/п	Параметры	Значение	Примечание
1	Модуль, мм	10	Соответствует требованиям чертежа
2	Глубина винтового профиля, мм	25	
3	Шаг осевой, мм	31,5	
4	Погрешность осевого шага, мм	±0,1	
5	Максимальная шероховатость поверхности Rz, мкм	80	

Таблица 5

Типовые детали машин, обрабатываемые ротационным точением и область применения технологии

№ п/п	Наименование деталей	Область применения технологии
1	Червяки архимедовых и конвалютных червячных передач по ГОСТ 18498	Технология может применяться в станкостроении, в тяжелом и транспортном машиностроении, специальном машиностроении, при изготовлении оборудования для нефтегазовой и горнорудной промышленности, черной и цветной металлургии, в оборонной промышленности, лесной и деревообрабатывающей, а также других отраслях машиностроительного комплекса
2	Червячные валы литьевых агрегатов, машин по переработке резины и пластмасс	
3	Ходовые винты шлаковозов, горизонтальных прессов, станков холодной прокатки труб, металлорежущих станков с трапециидальной резьбой с шагом 2…40 мм и диаметром 12…800 мм	
4	Обечайки канатных барабанов грузоподъемных машин типа электрических мостовых кранов, шахтных подъемных машин, драговых лебедок (диаметр 500…9000 мм и длина 600…6300 мм)	
5	Корпуса червячных фрез с модулем 10…20 мм (диаметр 100…250 мм и длина 800 мм)	
6	Винты шариковых винтовых передач	
7	Шнеки бусторных насосов и экструдеров	

Таким образом, ротационное резание является важным резервом повышения эффективности и качества механической обработки деталей машин.

Библиографические ссылки

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания. М. : Машиностроение, 1975. С. 105–113.

2. Сахаров Г. Н. Обкаточные инструменты. М. : Машиностроение, 1983.

3. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении / А. Д. Никифоров, А. Н. Новиков, Ю. Ф. Назаров, А. Г. Схитладзе. М. : Высш. шк., 2007. С. 290.

4. Гик Л. А., Шурыгин Д. И. Разработка универсальных конструкций роторных режущих головок и инструментов // СТИН. 2009. № 7. С. 10–13.

5. Федоренко М. А. Механическая обработка крупногабаритных поверхностей вращения без демонтажа в условиях эксплуатации // Технология машиностроения. 2008. № 10. С. 14–16.

6. Малько Л. С., Сутягин А. В., Трифанов И. В. Разработка многолезвийного инструмента для ротационного точения винтовой поверхности деталей машин // Вестник СибГАУ. Вып. 6 (32). 2010.

7. Малько Л. С., Сутягин А. В., Трифанов И. В. Особенности компоновки и изготовления устройства интегрированного с токарно-винторезным станком для ротационного точения винтовой поверхности детали многолезвийным инструментом // Вестник СибГАУ. Вып. 6 (32). 2010.

A. V. Sutjagin, L. S. Malko, I. V. Trifanov

TECHNOLOGICAL FEATURES MULTIFLUTED OF PROCESSING OF SCREW SURFACES ROTATIONAL SHARPEN

Possibilities and prospects of technology rotational sharpen external screw surfaces of details of cars compulsorily rotated multifluted are shown by the tool.

Keywords: rotational sharpen, a screw surface, multifluted the tool.

© Сутягин А. В., Малько Л. С., Трифанов И. В., 2011

Раздел
4

ЭКОНОМИКА

УДК 94

А. С. Абелян

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Рассматриваются теоретические и практические вопросы управления устойчивостью хозяйственных систем в современных условиях. Подтверждается необходимость разработки новых методических подходов и инструментальных средств к анализу и обеспечению устойчивости производственных систем.

Ключевые слова: экономическая система, устойчивость, гибкость, структура, обновление, модернизация.

Устойчивость представляет собой одну из динамических характеристик систем управления, выражающуюся в ее способности функционировать в условиях внешних и внутренних возмущающих воздействий. В общем виде система дестабилизирующих факторов представляется следующим образом: количественная недостаточность системы, качественная недостаточность, отказы, сбои, ошибки, высокая колеблемость интегральных показателей.

Трудность количественной оценки устойчивости объясняется сущностью этого явления: устойчивость уникальна в любой момент времени, поскольку это определенное состояние системы в единицу времени, которое не может повториться в точности, и может быть описана качественными показателями. Данное утверждение применимо исключительно к открытым системам, находящимся в состоянии динамического (квазистабильного) равновесия, в частности – экономическим. В отношении технических систем устойчивость поддается количественной оценке и даже может быть запрограммирована в ввиду способности таких систем находиться в состоянии статического равновесия, быть закрытыми от внешнего воздействия [1]. Экономические системы, как более сложные и саморегулирующиеся, требуют более глубокого исследования. Что касается общей теории устойчивости систем, то в посвященных ей работах основное внимание, как правило, уделяется состоянию системы на входе в нее или в ее начальном этапе функционирования. Такой подход наиболее эффективен при проведении локального анализа систем, в частности одного из секторов экономических взаимодействий организации с внешней средой. Структурно неустойчивой считается такая система, которая не имеет области устойчивости в пространстве всех ее параметров. «Чтобы сделать структурно неустойчивую систему устойчивой, необходимо изменить ее структуру» [2].

Причем равновесное (инерционное), т. е. без роста объема (масштаба), функционирование экономической системы длится сравнительно недолго. Это вынуждает менеджмент системы (в частности хозяйственной организации) сосредоточивать основное внимание на этапах ее развития и спада как на наиболее проблемных, ресурсоемких и сущностно определяющих. Развивающаяся экономичная система в силу динамических свойств ее элементов и связей всегда функционирует в переходном режиме, поэтому говоря о ее устойчивости имеют в виду динамическую устойчивость. Главным условием устойчивости системы является ее способность к саморегулированию, адаптивность, т. е. приспособляемость к изменившимся условиям среды (внешней и внутренней). Современной управленческой практике теория и методология устойчивости может быть полезна по нескольким причинам: во-первых, активируется поток инноваций в реальный сектор и наблюдается устойчивое становление экономики знаний, во-вторых, высокая степень неопределенности макросреды переходного периода не преодолена, в-третьих, ввиду продвижения возможностей инструментального оснащения управленческих технологий, использующих новейшие средства поддержки адаптивного, гибкого поведения экономических объектов. Трансформируемая рыночная экономика отличается труднопредсказуемыми многовекторными процессами как внутри, так и вне хозяйствующих субъектов, возникающие в ней колебания не могут сглаживаться лишь рыночными регуляторами и требуют сопровождения превентивными мерами государственного управления. Монетарный подход к разрешению противоречий монополизированной российской экономики показал свою несостоятельность, что подтверждает необходимость разработки новых теоретико-методологических подходов и инструментальных средств к анализу и обеспечению устойчивости производственных систем.

В числе симптомов неустойчивого состояния предприятия выделяются следующие:

– длительная безрезультативность вложений в производство (неверно определен объект инвестиций);

– высокая изменчивость базовых параметров организации от незначительных воздействий;

– необратимость отклонений в деятельности организации и возможных перемен, утрата способности к восполнению потерь;

– предлагаемые схемы реструктуризации предприятия непосильны для организации.

Система управления устойчивостью производственных систем сегодня представляется как сложный, многофункциональный механизм обеспечения обнаружения и локализации потенциальных угроз и реагирования на них для поддержания устойчивости систем в рыночной среде.

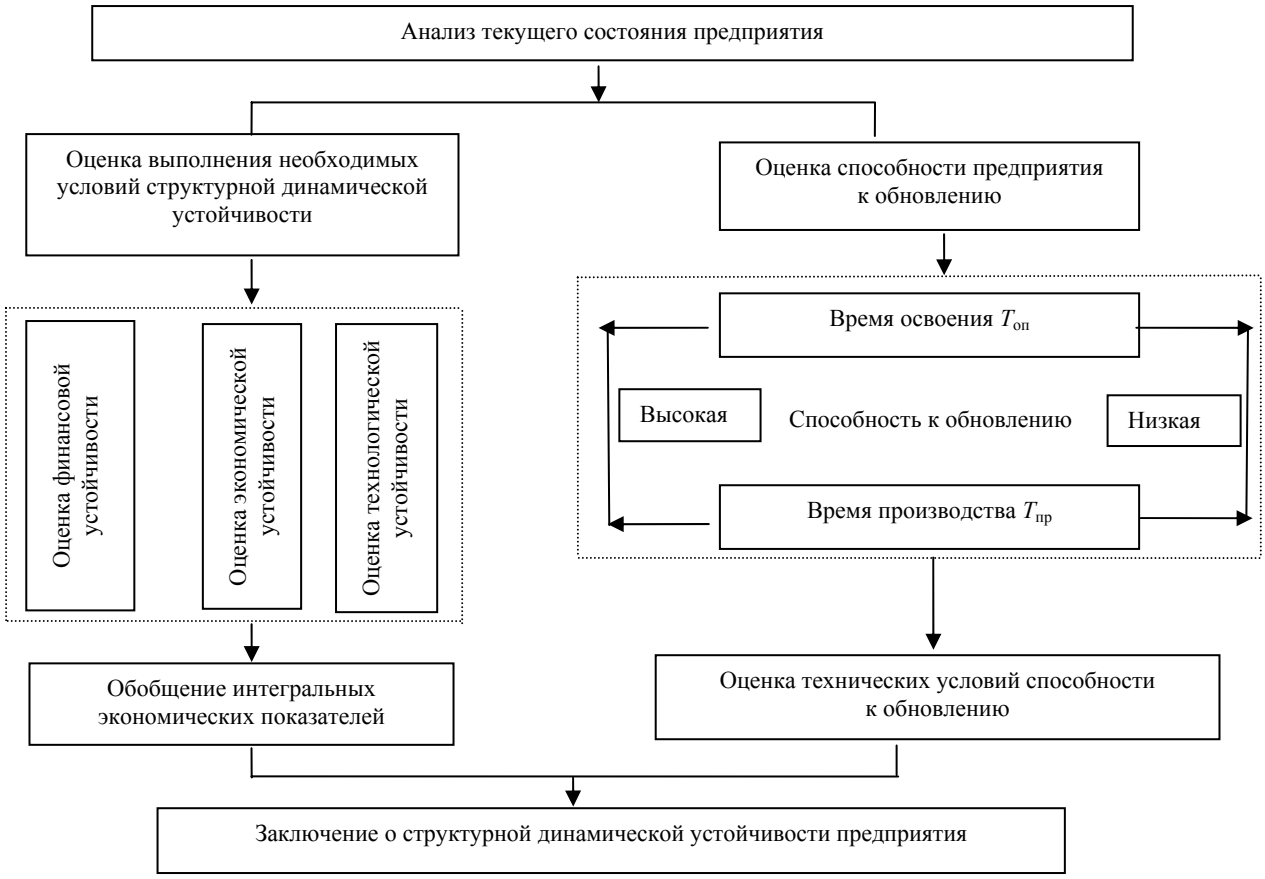


Рис. 1. Алгоритм оценки структурной динамической устойчивости предприятия (отрасли)

Данный подход представляется несколько ограниченным, ввиду того, что в нем не находят отражение потенциальные возможности, предоставляемые внешней средой, а отсюда и неразвитость инструментария своевременного использования этих возможностей субъектом. Экономическая система обладает свойством структурной динамической устойчивости, если трансформация ее структуры не приводит к нарушению финансовой, экономической и технологической устойчивости при сохранении устойчивости функционирования системы относительно поставленных целей.

В соответствии с этим определением можно рассматривать выполнение необходимых и достаточных условий структурной динамической устойчивости.

Необходимые условия выполняются при сохранении финансовой, экономической и технологической устойчивости. Расширение спектра подходов в оценке эффективности систем управления устойчивостью позволит агрегировать теоретический и практический аспекты управления устойчивостью производственных систем с учетом влияния на них широкого диапазона институциональных и модернизационных факторов.

Разработка методов и средств адаптации предприятий к трансформируемой экономической среде должно стать тем инструментом нейтрализации воздействий, препятствующих устойчивому функционированию и развитию производственных систем.

Современная экономика знаний формируется на фоне ускорения модернизационных процессов и широкого освоения наукоемких технологий в промышленном производстве. По оценке С. Ю. Глазьева, сегодня до 95 % прироста валового внутреннего продукта развитых стран обеспечивается научно-техническим прогрессом. Необходимость сохранения и достижения определенного уровня эффективности работы предприятия в нестабильной внешней среде, а также внутренней (модернизируемой) заставляет вновь обратиться к системной интерпретации его структуры и организационного поведения и проследить их эволюцию с точки зрения концепции постоянных изменений. В рамках ее организация и управление предприятием поддерживают его жизнеспособность и продуктивность с помощью инноваций, введения и накопления в его производственной системе информации в форме ситуационных управленческих решений по постоянному реинжинирингу производства. Ослабление внешних связей предприятия влечет за собой повышение непредсказуемости в его поведении, так как разрушаются базис целеполагания, приоритетность в выделении и решении задач, нарушаются организационно-технологические связи между производственными системами и их координация. С ростом разнообразия состояний производственной системы повышается и неопределённость в ее поведении. Растёт в ней и энтропия, ограничить которую способно усиление обратных связей экзогенная среда – эндогенная среда. Таким образом, чем больше накоп-

лено информации в производственной системе, тем меньше в ней энтропии и неопределенности в работе и, наоборот, снижение количества информации в системе ведет к увеличению энтропии и повышению неопределенности в ее поведении. С изучением неравновесных процессов становилось очевидным, что система удаляется от начального состояния и утрачивает свойство возврата к нему. При изменении управляющего параметра системы (например, количества подводимой к ней энергии) может возникнуть неустойчивость, и система переходит в другое состояние. Ускоряющийся поток перемен, обрушивающихся на производственные системы, может расстроить ее намеченное поведение и расшатать устойчивое движение системы, и тогда перспективы ее функционирования зависят от способности адаптироваться к турбулентной внешней среде и предотвратить деградацию ресурсов системы. С позиций цикличности изменения упорядоченности системы можно вести речь о характерных этапах в ее жизни, среди которых Б. Ю. Сербиновский выделяет этапы расширения упорядоченности (закрепления устойчивого состояния системы), относительной неизменности соотношения упорядоченности и хаоса, уменьшения упорядоченности при переходе из одного состояния в другое, которое сопровождается практически полным или частичным разрушением прежней упорядоченности и активным поиском нового устойчивого состояния.

Как на макроуровне, так и на микроуровне, т. е. применительно к промышленным фирмам, можно заметить, что процессы спада и подъема их деловой активности также имеют определенные амплитудные и временные границы, превышение которых приводит их в необратимое (на прежнем уровне равновесия) состояние. Это обусловлено следующим: во-первых, промышленные организации функционируют в тесном взаимодействии с финансовыми и напрямую зависимы от происходящих в них процессов спада и подъема; во-вторых, глобализация экономики делает промышленные организации зависимыми не только от финансовых институтов, но и динамических характеристик других элементов внешней среды (конкуренты, поставщики, потребители, транснациональные производственные конгломераты, генезис техники и технологии, государственные и общественные институты и др.). Указанные аргументы формируют область определения функции, соответствующие значения которой очерчены границей перехода промышленной организации в иную субстанцию (с другими параметрами качества: размеры; производственная структура, номенклатура продукции, состав персонала).

Таким образом, неустойчивое состояние предприятия представляет собой сложное экономико-технологическое явление, занимающее достаточно широкую полосу в ее жизненном цикле.

Одно из узких мест в развитии российских предприятий в настоящее время – недостаточно обоснованные действия в областях финансового и производственного менеджментов, маркетинга и сбыта.

Основным критерием для раскрытия гибкости предприятия является его способность прогнозировать и планировать процесс своего развития (рис. 2).

Продукция, освоенная в текущем цикле 1, позволяет получить определенный экономический результат в следующем цикле 2, обеспечивающий выживаемость и гибкое развитие предприятия. Здесь может быть разделение на три части, что и позволяет осуществить диагностику и оценку гибкого развития предприятия текущего периода (Д), долгосрочное (ДП), и стратегическое планирование (СП) будущих периодов.

Задачу оценки гибкости предприятия можно представить схемой как передаточную функцию системы автоматического регулирования (рис. 3).

Для части формулы, описывающей устойчивость к обновлению $Y_{об}$, составляющими примем показатель рентабельности продаж, оборачиваемость активов, финансовый рычаг, норму прибыли на освоение новых изделий для рынка:

$$Y_{об} = R_n \, ОА \cdot ФР \cdot Н,$$

где R_n – рентабельность продаж; ОА – оборачиваемость активов; ФР – финансовый рычаг; Н – норма прибыли на освоение новых изделий.

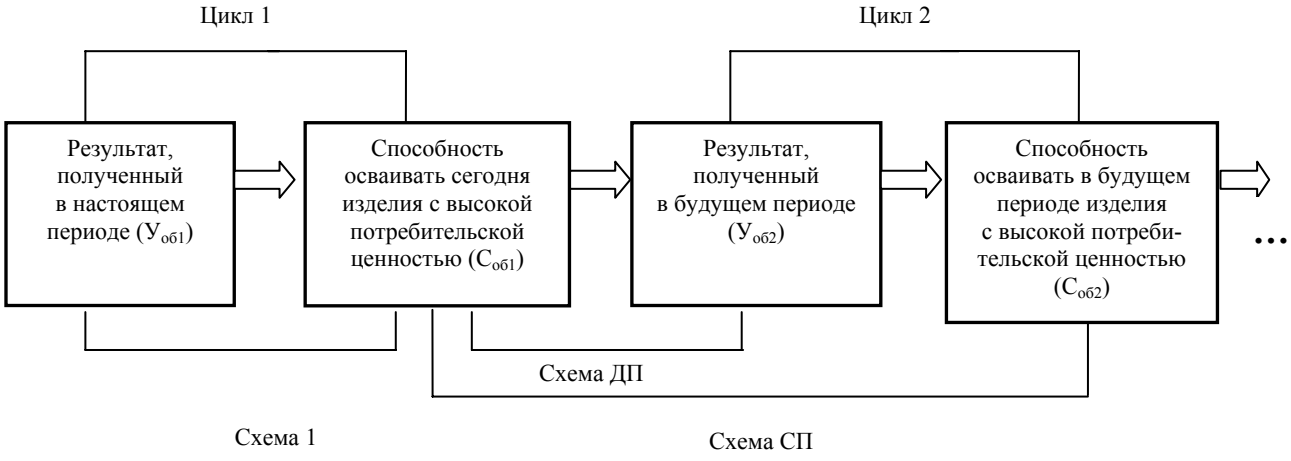


Рис. 2. Схема адаптивного развития предприятия

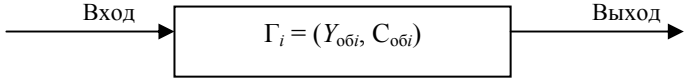


Рис. 3. Схема оценки гибкости предприятия
Γ_i – математическая зависимость, обеспечивающая схемы Д, ДП, СП в i-х циклах; $Y_{\text{об}i}$ – устойчивость (результат) к обновлению в различных i-х циклах; $C_{\text{об}i}$ – способность к обновлению в различных i-х циклах

Для части формулы, описывающей способность к обновлению $C_{\text{Об}}$, составляющими могут стать время нахождения продукта в различных стадиях НИОКР и освоении, производстве и реализации, а также номенклатура изделий, востребованная на рынке.

Способность предприятия к обновлению определяет способность предприятия к освоению в текущем периоде новых изделий, требуемых рынком последующие периоды.

Требуется найти показатель, который может оценить способность предприятия к освоению новых изделий.

Для этого жизненный цикл продукта разобьем на следующие этапы:

– Z_i – НИОКР;

– Z_2 – подготовка, реструктуризация производства;

– Z_3 – освоение производства;

– Z_4 – серийное производство продукции;

– Z_5 – реализация продукции.

Состояния Z_1, Z_2, Z_3 характеризуют этап освоения производства.

Сумма средних времен Z_1, Z_2, Z_3 есть $T_{\text{оп}}$ – время освоения продукта.

Исходя из этого, появляется возможность положить в основу оценки гибкости предприятия к обновлению моделирования цикла освоения производства, выпуска и реализации продукции.

Время освоения $T_{\text{оп}}$ – внутренний фактор гибкости предприятия, определяющий цикл, состоящий из трех этапов: НИОКР, подготовка производства, освоение производства.

Время производства и реализации нового изделия $T_{\text{пр}}$ – внешний фактор гибкости предприятия, определяющий цикл продукции как изменяющийся во времени процесс, проходящий фазы рождения, роста, зрелости, упадка.

Коэффициент обновления $K_{\text{о}}$ через соответствующее время выполнения этапов характеризует работу всех основных подразделений, служб и цехов предприятия, состояние технологического оборудования, отражает требуемую временем способность быстро перестраиваться на выпуск новых изделий, отвечать запросам рынка и обеспечивать их сильный конкурентный статус. С другой стороны, $K_{\text{о}}$ позволяет количественно оценить гибкость предприятия и поэтому рассматривается как один из основных показателей его комплексной гибкости. Определение коэффициента $K_{\text{о}}$ осложнено тем, что процесс освоения запуска в производство принципиально нового продукта всегда обладает свойством неопределенности (стохастичности), вследствие действия рыночных факторов: колебания потребительского спроса, перебои в снабжении сырьем и материалами, сбыт готовой продукции, действия конкурентов и т. д.

В связи с этим для разработки метода определения $K_{\text{о}}$ необходима вероятная модель освоения нового продукта. Предприятие в данном случае рассматривается как открытая система, подверженная случайным внешним воздействиям.

В качестве инструментария моделирования рассматриваемого цикла возможно использование марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Для исследуемого случайного процесса произведем следующие допущения.

Состояния системы будем считать дискретными, так как можно указать четкие границы начала и конца ее пребывания в каждом из них. Их совокупность образует последовательность (цепь) с непрерывным временем.

Управление факторами, влияющими на производственный процесс, дает возможность реализовывать более гибкую политику на рынке и как следствие переходить к более высшему состоянию функционирования и развития.

Чем выше доля прибыли, тем больше возможности увеличить объем собственных средств. Чем больше оборотов совершают собственные средства, тем меньшая их величина нужна для обслуживания процессов производства и реализации. Синтез этих двух показателей определяет общую устойчивость и эффективность предприятия. Чем больше доля прибыли, направляемая на обновление продукции (в конечном итоге), тем выше гибкость предприятия при определении величины средств, направляемых на эти цели. Необходимо отметить, что этот процесс является двусторонним, модель видоизменяясь сама оказывает влияние на возмущения, являясь для них внешней средой и заставляет их в свою очередь изменяться.

Для определения коэффициента обновления $K_{\text{о}}$ необходим специальный подход, учитывающий неопределенность и вероятность освоения любого нового продукта. Сформировав массив исходных данных для определения $K_{\text{о}}$ и рассчитывая N (количество изделий в освоении) для любого момента времени получаем научно обоснованный процесс прогнозирования освоения новых изделий.

Физический смысл коэффициента обновления заключается в особенности освоения предприятием нового изделия в замен старого, находящегося в производстве, как случайное событие A, которое может наступить с некоторой вероятностью $P_{\text{д}}$.

Использование этой формулы позволяет сделать планируемым и прогнозируемым процесс развития

предприятия, так как раскрывает закономерность между среднегодовым количеством изделий, находящихся в освоении и следующими важнейшими показателями работы предприятия:

– временем подготовки и освоения нового изделия;

– временем производства и нахождения товара на рынке;

– номенклатурой производимых изделий, востребованных рынком.

Критерий оценки способности предприятия к обновлению должен отвечать следующим требованиям:

– представительность, т. е. позволять оценивать эффективность решения основной, а не второстепенных задач;

– критичность к исследуемым параметрам, т. е. изменение любого из исследуемых параметров должно приводить к соответствующему изменению критерия;

– простым – на него не должны влиять второстепенные величины, единым, так как решение задачи при нескольких критериях крайне затруднено.

В рамках рассмотренной модели предлагается метод организационного проектирования стратегического развития предприятия, где важнейшими факторами являются два производственных блага – период обновления новой продукции $T_{оп}$, период производства продукции и реализации $T_{пр}$.

Отношение времени освоения изделия $T_{оп}$ к времени производства и реализации изделия $T_{пр}$ представляет коэффициент обновления:

$$K_{об} = T_{оп}/T_{пр};$$

где $T_{пр}$ – текущий период производства и реализации продукции на данный момент времени; $T_{оп}$ – время освоения новой продукции.

Используя коэффициенты $K_о$, $K_р$ в различных вариантах, появляется возможность сопоставления фактических и нормативных циклов $T_{пр}$, $T_{оп}$, $K_о$, определения области жизненного цикла, в котором находится исследуемый вид продукции и целесообразности продолжения производства, где $K_Р$ – показатель, включающий оценку фактических и нормативных циклов $T_{пр}$ и $T_{пр}$ относительно коэффициента обновления продукции Ко, задающего основную закономерность внутренних и внешних факторов развития.

Используя график жизненного цикла товара и математическую зависимость фазы жизненного цикла от времени, можно математически описать начальные и конечные точки различных периодов жизненного цикла продукта. Использование данной методики в модели гибкого развития предприятия позволяет сделать планируемым и прогнозируемым процесс развития предприятия, так как раскрывает зависимость между количеством наименований продукта, находящимся в освоении и важнейшими параметрами функционирования предприятия.

Предложенные методологические основы управления промышленными предприятиями, базирующиеся на использовании системы агрегированных моделей управленческой деятельности, способны обеспечить совокупное наблюдение и анализ внешней и внутренней сред предприятия в их взаимодействии, и выработать адекватные управленческие действия по повышению устойчивости предприятия.

Библиографические ссылки

1. Ляпунов А. М. Избранные труды: работы по теории устойчивости / отв. ред. Д. В. Трещев ; Мат. ин-т им. В. А. Стеклова РАН. М. : Наука. 2007.

2. Амбросов Н. В. Управление и самоорганизация в экономике и отраслях промышленности. Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2007.

A. S. Abeljan

MANAGEMENT OF STABILITY OF ECONOMIC SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF MODERNIZATION CHANGES

Theoretical and practical questions of management by stability of economic systems in modern conditions are considered. Necessity of working out of new methodical approaches and tool means to the analysis and maintenance of stability of industrial systems proves to be true.

Keywords: economic system, stability, flexibility, structure, updating, modernization.

© Абелян А. С., 2011

УДК:658:005.336.4

Н. Г. Агафонова

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ: СУЩНОСТЬ, ОСОБЕННОСТИ ВОСПРОИЗВОДСТВА

Обобщены теоретические подходы к определению понятия «интеллектуальный потенциал предприятия». Определено место и роль интеллектуального потенциала в системе интеллектуального обеспечения предприятия.

Ключевые слова: интеллектуальное обеспечение предприятия, интеллектуальные ресурсы предприятия, интеллектуальный капитал предприятия, интеллектуальный потенциал предприятия, нематериальные активы, воспроизводство.

На сегодняшний день способность генерировать, использовать и распространять новые знания становится основой национальной конкурентоспособности и базовым условием оптимизации социально-экономического роста каждого государства. В 2000 г. страны ЕС провозгласили, что к 2010 г. Европа станет наиболее конкурентоспособным обществом в мире – обществом знаний. В данных условиях, реформирование национальных экономик развивающихся стран должно быть направлено на доминирование в структуре ВВП высокотехнологических отраслей и интеллектуальных услуг, а также достижение высокого уровня капитализации промышленных предприятий за счет активного использования интеллектуальных ресурсов предприятия.

Ускорение развития экономики и повышение конкурентных преимуществ каждого государства на мировых рынках возможны при условии эффективного использования, в первую очередь, интеллектуально-инновационных факторов предприятий. Современное состояние научно-технического потенциала Украины не способно в полном объеме обеспечить выполнение этого условия, что частично объясняется существующим противоречием между его количественными и качественными характеристиками. Количество научных учреждений на сегодняшний день составляет 1 378, из которых 55,5 % относятся к отраслевому сектору науки. В то же время наблюдается низкий уровень научных разработок и инноваций в промышленности (количество изобретателей и рационализаторов за последние десять лет сократилось более чем в 20 раз). В среднем промышленные предприятия тратят на исследования и разработки менее 1 % от стоимости выпускаемой продукции [1]. Таким образом, вопросы формирования и развития интеллектуального потенциала, интенсификации использования интеллектуальных ресурсов и наращивания интеллектуального капитала промышленных предприятий являются очень актуальными.

Теоретическое исследование понятия «интеллектуальный потенциал предприятия» отражено в работах В. В. Глухова, С. Б. Коробко, Т. В. Марининой [2], В. В Прошак [3], О. В. Корневой [4], В. И. Хомякова, И. В. Бакум [5], Н. П. Пятковой [6] и др.; отдельным аспектам взаимосвязи интеллектуальных потенциала, ресурсов и капитала предприятия посвящены работы О. В. Авдейчика, В. И. Кравченко, Г. А. Костюковича [7], М. И. Мурашко [8] и др. Однако нерешенными остаются вопросы обобщения теоретических подходов к определению интеллектуального потенциала предприятия, а также выявления места и роли интеллектуального потенциала в системе интеллектуального обеспечения предприятия (интеллектуальные ресурсы и капитал предприятия), что определяет цель данной статьи.

Успешность современного предприятия зависит от наличия возможности развития интеллектуальных качеств и способностей его работников: возможности персонала предприятия получать, хранить, обрабатывать информацию; создавать новые знания; принимать рационально обоснованные решения; формулировать цели и контролировать деятельность по их достижению; оценивать ситуации, которые возникают в процессе функционирования предприятий и др. Среди первых важнейшими являются профессионализм и инициативность, среди вторых – способности к творческой деятельности и новаторству, каждые из которых по своему содержанию входят в понятие «интеллектуальный потенциал предприятия».

В современной научной литературе существует два подхода к определению роли интеллектуального потенциала в деятельности предприятия: первый определяет интеллектуальный потенциал предприятия как источник интеллектуальных ресурсов и капитала предприятия [3]; второй – как результат от использования интеллектуальных ресурсов и капитала предприятия [4; 5]. Опираясь на общее определение потенциала предприятия, интеллектуальный можно трактовать как совокупность способностей персонала предприятия к умственной деятельности, связанной с усвоением, осознанием и систематизацией информации и последующим преобразованием её в знания, необходимые для успешного функционирования предприятия. По мнению О. В. Корневой, интеллектуальный потенциал предприятия – это результат накопления знаний во внутреннем пространстве организации [4]. Такой же точки зрения придерживаются В. И. Хомяков и И. В. Бакум, которые определяют потенциал как деятельно-результативную категорию [5].

По мнению В. В. Глухова, интеллектуальный потенциал предприятия можно рассматривать как его готовность к генерированию и освоению инноваций,

которая предполагает наличие определенного объема накопленных знаний, опыта инновационной деятельности, достаточного интеллектуального уровня сотрудников [2]. В более узком смысле, интеллектуальный потенциал предприятия определяют как совокупность творческих способностей и образовательно-квалификационного уровня персонала предприятия, дающую возможность усваивать существующие и создавать новые знания, в том числе используя овеществленные результаты интеллектуального труда, для эффективного развития предприятия [3]. Таким образом, интеллектуальный потенциал предприятия можно обобщить как совокупность интеллектуальных возможностей предприятия, которые включают в себя интеллектуальные качества и способности персонала, его образовательный, культурный, теоретический, практический опыт и результаты интеллектуального труда в виде новых знаний, умений и навыков, которые могут быть использованы в деятельности предприятия.

На сегодняшний день одним из важнейших факторов производства являются интеллектуальные ресурсы предприятия, активное использование которых в организационно-управленческой деятельности предприятия способствует преобразованию рабочей силы в труд, земли и недр – в условия производства, сбережений – в инвестиции [7]. Универсальность применения интеллектуальных ресурсов в деятельности предприятия дает возможность отнести их к стратегическим ресурсам, которые обеспечивают эффективность использования всех видов ресурсов, формирование долгосрочных конкурентных преимуществ и устойчивость развития предприятия. Н. П. Пяткова отмечает, что к стратегическим ресурсам должны быть отнесены не средства производства, предметы труда или определенные категории работников, а те возможности достижения стратегических целей предприятия, которые открываются при использовании этих средств, предметов и категорий работников [6]. Следовательно, интеллектуальные ресурсы предприятия можно определить как совокупность знаний, умений, навыков, качеств и способностей персонала предприятия, необходимых для создания инноваций производственного и организационного характера, которые обеспечивают рост конкурентоспособности предприятия.

Тесно связаны с понятием интеллектуальных ресурсов предприятия нематериальные активы предприятия, которые состоят из объектов интеллектуальной собственности (объекты промышленной собственности; объекты, которые охраняются авторскими и смежными правами; другие (нетрадиционные) объекты интеллектуальной собственности). К объектам промышленной собственности относятся изобретения, полезные модели, промышленные образцы, товарные знаки и др. Объекты, которые охраняются авторскими и смежными правами: произведения в области науки, литературы и искусства; компьютерные программы; базы данных и др. Рационализаторские предложения, «ноу-хау», коммерческие тайны, относятся к нетрадиционным объектам интеллектуальной собственности.

В балансе предприятия, согласно положению (стандартов) бухгалтерского учета 2, нематериальные ресурсы отображаются в статье «нематериальные активы». Использование понятия «актив» подчеркивает, что речь идет о контролируемых предприятием в результате прошлых событий ресурсов, использование которых, как ожидается, приведет к поступлению экономических выгод в будущем. Содержание интеллектуального потенциала предприятия, к которому относятся интеллектуальные и деловые качества персонала предприятия, его квалификация и способности к труду, несмотря на их нематериальную природу, на сегодня не учитываются в статье «нематериальные активы» по следующим причинам: отсутствие возможности достоверной оценки; отсутствие факта приобретения или создания (соответственно отсутствие расходов); невозможность отчуждения от носителя.

Научные работники и большинство практиков-экономистов, которые придерживаются консервативных взглядов, выступают против отражения этих объектов в учетной системе и балансах (на таких позициях также находится Комитет по международным стандартам), так как любая их оценка является, в большей степени, субъективной. На сегодня все нематериальные активы, которые не учитываются в балансе предприятия, отображаются в статье баланса «гудвил», который является разницей между ценой покупки-продажи предприятия и его чистых активов. Таким образом, невозможность включения интеллектуальных ресурсов предприятия в состав нематериальных активов предприятия не дает оснований говорить об их тождественности.

Для практической деятельности научное осмысление содержания и структуры интеллектуального капитала предприятия имеет большое значение. Существует множество подходов к трактовке понятия интеллектуальный капитал, в широком смысле – это все, что способно приносить доход, или ресурсы, созданные людьми для производства товаров и услуг. В отличие от вспомогательной роли ресурса капитал выполняет основную роль, которая раскрывается в способности генерировать дополнительную стоимость. Интеллектуальный капитал на уровне общего понимания определяется как экономическая категория, которая выражает социально-экономическую форму невещественных ценностей интеллектуальной природы, которые, становясь объектом чьей-либо собственности, накапливаются за счет инвестиций, производительно используются в общественном хозяйстве в течение определенного времени с целью получения дохода или других форм удовлетворения потребностей [8]. Таким образом, интеллектуальный капитал предприятия можно определить как деятельно-результативную категорию, главными составляющими которой являются интеллектуальные ресурсы предприятия, способные к самовозрастанию, активно задействованные в интеллектуальной деятельности предприятия.

На сегодняшний день, в научной литературе чаще всего используется структура интеллектуального капитала, разработанная Л. Едвинссоном и М. Мелоуном [9], которая состоит из двух частей: структурного и человеческого капиталов. Первый, в свою очередь, включает клиентский и организационный капиталы (рис. 1).

К категории структурный капитал относятся техническое и программное обеспечение, организационная структура, патенты, торговые марки, отношения, которые сложились между компанией и ее клиентами, т. е. все то, что позволяет работникам компании реализовать свой производственный потенциал. В отличие от человеческого капитала, структурный может быть собственностью компании, а следовательно, и объектом купли-продажи. Человеческий капитал – это совокупность знаний, практических навыков и творческих способностей служащих компании, прилагаемая к выполнению текущих задач, а также моральные ценности компании, культура труда и общий подход к делу. Таким образом, понятие человеческого капитала и интеллектуальных ресурсов предприятия тесно переплетаются. Основное отличие между ними сформулировано С. Вовканич и Л. Семивым: «Если интеллектуальный или человеческий капиталы остаются нераскрытыми в производительной деятельности человека, то они является всего лишь ресурсами».

Как функциональная составляющая часть инновационного производства человеческий капитал включает знания и практический опыт, одухотворенные интеллектуальной активностью, которая выступает формой интеллектуальных, морально- и культурно-ориентированных способностей персонала к созданию нового, ранее неизвестного знания, которое обеспечивает получение различных конкурентных преимуществ. В работе О. А. Гришновой человеческий капитал можно рассматривать на трёх уровнях: личностном, микроэкономическом и макроэкономическом. На личностном уровне человеческий капитал – это знание, навыки и другие интеллектуальные характеристики, которые человек получил путем образования, профессиональной подготовки, практического опыта, благодаря своим естественным способностям. На микроуровне человеческий капитал представляет собой совокупную квалификацию и интеллектуальные способности всех работников предприятия. На макроуровне (национальный) – включает накопленные вложения страны в такие характеристики населения, как уровень образования, профессиональную подготовку, компетентность, здоровье и нравственность. Авторы А. С. Акопян, В. В. Бушуев и В. С. Голубев выделяют три компонента человеческого капитала: жизненный, социальный и духовный. Жизненный капитал – это врожденные способности человека. Социальный капитал человек получает в течение жизни, в частности, за счет социальных расходов государства (образование, здравоохранение, социальные расходы и др.). Духовный капитал человек получает через его внутреннюю жизнь путем самоусовершенствования.

Взаимосвязь между главными составляющими интеллектуального обеспечения предприятия: интеллектуальный потенциал, ресурсы и капитал предприятия – исследуется в роботе С. М. Климова, где процесс воспроизводства интеллектуальных ресурсов предприятия представлен тремя этапами [10]. На первом этапе воспроизводства интеллектуальных ресурсов предприятия происходит преобразование интеллектуального потенциала в интеллектуальные ресурсы предприятия, т. е. преобразование возможностей и интеллектуальных источников в реальные знания, способности, умения персонала предприятия. На втором этапе происходит самовозрастание интеллектуальных ресурсов предприятия (знания, умения и навыки в процессе их переосмысления и усовершенствования порождают новые знания, умения и навыки). На третьем этапе воспроизводства интеллектуальных ресурсов происходит их использование в деятельности предприятия (в частности инновационной), т. е. создание продуктов интеллектуальной деятельности (материализация интеллектуальных ресурсов предприятия). Мы считаем, что одновременно с процессом воспроизводства интеллектуальных ресурсов предприятия происходит аналогичный процесс воспроизводства интеллектуального потенциала предприятия (рис. 2).

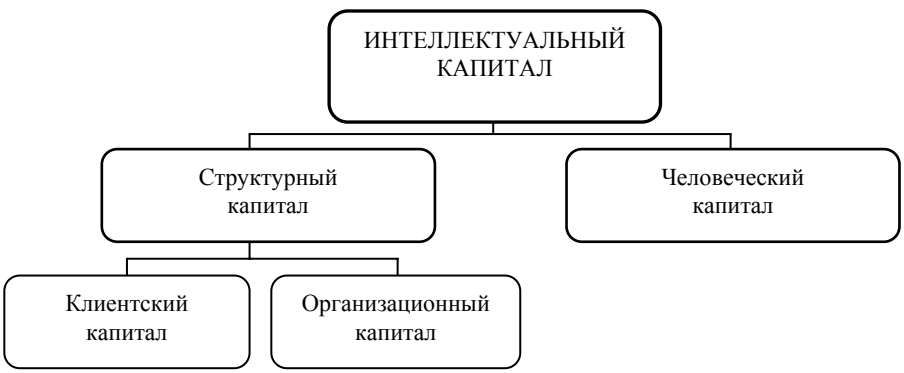


Рис. 1. Структура интеллектуального капитала (Л. Едвинссон и М. Мелоун)

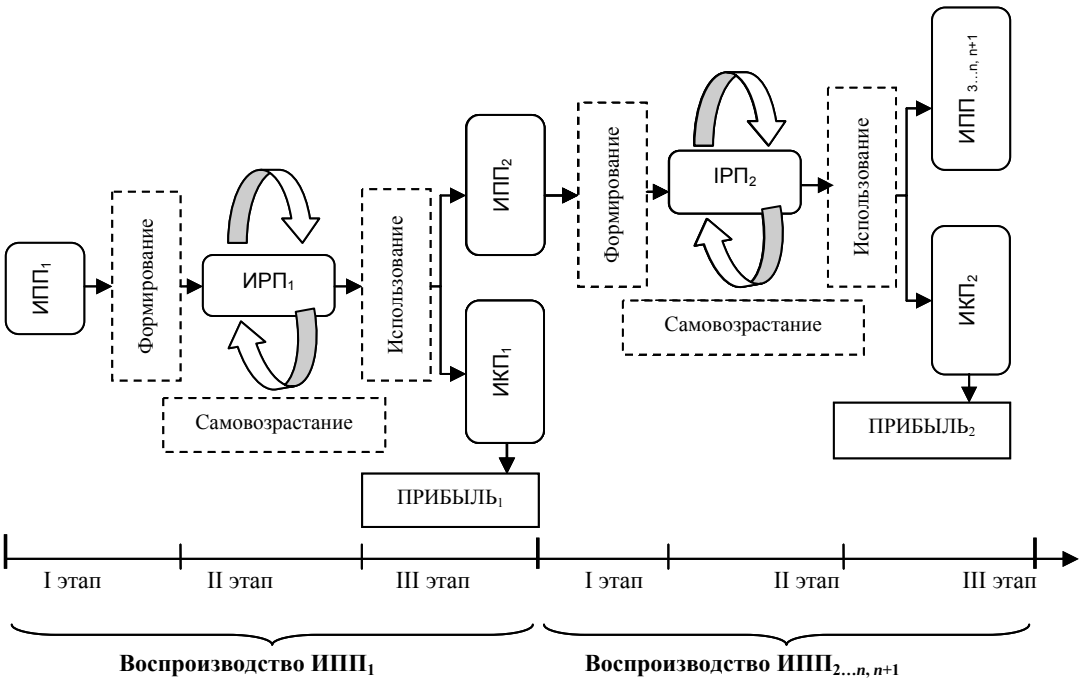


Рис. 2. Воспроизводство интеллектуального потенциала предприятия:
ИПП – интеллектуальный потенциал предприятия; ИРП – интеллектуальные ресурсы предприятия;
ИКП – интеллектуальный капитал предприятия; 1, 2, … n, n+1 – этапы воспроизводства ИПП

Специфика взаимосвязи интеллектуального потенциала, ресурсов и капитала предприятия, проявляется в том, что интеллектуальные ресурсы являются основной составляющей интеллектуального потенциала и капитала предприятия. Отличием интеллектуальных ресурсов предприятия в составе интеллектуальных потенциала и капитала предприятия является активное или пассивное участие интеллектуальных ресурсов в деятельности предприятия, т. е. интеллектуальный потенциал предприятия состоит из совокупности интеллектуальных ресурсов, которые временно не задействованы в деятельности предприятия (условно их можно назвать «пассивные интеллектуальные ресурсы») и возможностях появления таких интеллектуальных ресурсов. Интеллектуальный капитал предприятия, в свою очередь, состоит из интеллектуальных ресурсов, которые задействованы в деятельности предприятия («активные интеллектуальные ресурсы») и развиты до уровня капитала, т. е. процесс их использования сопровождается появлением новых интеллектуальных ресурсов предприятия ($ИРП_{1, 2…n, n+1}$).

Воспроизводство интеллектуального потенциала предприятия связано с тем что, появлению новых интеллектуальных ресурсов предшествует появление дополнительной возможности в виде новых знаний, умений и навыков (пассивные интеллектуальные ресурсы), этот процесс сопровождается ростом интеллектуального потенциала предприятия ($ИПП_1 < ИПП_2 < <…ИПП_n < ИПП_{n+1}$). В процессе создания интеллектуальных ресурсов ($ИРП_{1, 2…n, n+1)}$ и капитала предприятия ($ИКП_{1, 2…n}$) интеллектуальный потенциал предприятия выступает их источником, однако последующее его воспроизводство ($ИПП_{2,…n, n+1}$) обусловливает необходимость рассматривать его также как результат. Таким образом, существующее противоречие между научными подходами, в которых интеллектуальный потенциал предприятия рассматривается как источник и результат формирования интеллектуального обеспечения организации, можно разрешить следующим образом: интеллектуальный потенциал предприятия можно рассматривать как «источник», «результат и источник» и «результат» в зависимости от этапа воспроизводства, на котором находится интеллектуальный потенциал предприятия. В качестве источника интеллектуального обеспечения предприятия интеллектуальный потенциал выступает на первом этапе воспроизводства ($ИПП_1$); как результат и источник одновременно – на последующих этапах ($ИПП_{2…n}$); как результат интеллектуальный потенциал предприятия – на конечном этапе его формирования ($ИПП_{n+1}$).

Таким образом, обобщение теоретических подходов к определению и выявлению составляющих интеллектуального потенциала предприятия дало возможность определить сущность категории «интеллектуальный потенциал предприятия» – это совокупность интеллектуальных возможностей предприятия, которые состоят из интеллектуальных качеств и способностей персонала предприятия, его образовательного, культурного, теоретического, практического опыта и результатов интеллектуального труда в виде новых знаний, умений и навыков, которые могут быть использованы в деятельности предприятия. Выявление места и роли интеллектуального потенциала в системе интеллектуального обеспечения предприятия (интеллектуальные ресурсы и капитал предприятия) позволило разработать основные этапы его воспроизводства.

За последние годы в Украине финансирование фундаментальных исследований не превышало 0,2 % ВВП, тогда как в развитых странах этот показатель равняется 0,5–0,6 % ВВП. Фактически часть ВВП, которая тратится на научные исследования в Украине, в 2–2,5 раза меньше, чем в развитых странах мира [1]. Увеличение объемов мирового машиностроительного производства приблизительно в 94,5 раза способствует росту части машиностроения в структуре промышленного производства, которая с 1950 по 2000 гг. возросла в развитых странах с 22,4 до 45,3 %. При таких условиях, перспективой последующих исследований является разработка механизма формирования и развития интеллектуального потенциала в рамках отдельных предприятий, в частности машиностроительных, которые при благоприятных условиях могут стать «локомотивом» модернизационных преобразований экономики Украины.

Библиографические ссылки

1. Новий курс: реформи в Україні 2010–2015. Національна доповідь / за заг. ред. В. М. Гейця [та ін.]. Киев : НВЦ НБУВ, 2010.

2. Глухов В. В., Коробко С. Б., Маринина Т. В. Экономика знаний. СПб. : Питер, 2003.

3. Прошак В. В. Інтелектуальний потенціал України в умовах ринкової трансформації економіки : автореф. дис. … канд. екон. наук : 08.01.01 / В. В. Прошак ; Львівський національний ун-т ім. Івана Франка. Львів, 2002.

4. Корнєва О. В. Використання характеристик інтелектуального капіталу і інтелектуального потенціалу // Наукові праці ДонНТУ. 2007. Вип. 31-3. С. 251–257. (Серія: економічна).

5. Хомяков В. І., Бакум І. В. Управління потенціалом підприємства. Киев : Кондор, 2007.

6. П'яткова Н. П. Формування ресурсного потенціалу металургійного підприємства : дис. … канд. екон. наук. Луганськ, 2008.

7. Авдейчик О. В., Кравченко В. И., Костюкович Г. А. Интеллектуальное обеспечение инновационной деятельности промышленных предприятий // Научно-инновационная политика в регионах Беларуси : материалы республиканской науч.-практ. конф. Минск : ГУ «БелИСА», 2005.

8. Мурашко М. І. Інтелектуальний капітал як елемент економічного зростання України // Демографія та соціальна економіка. 2007. № 2. С. 116–129.

9. Эдвинссон Л., Мэлоун М. Интеллектуальный капитал. Определение истинной стоимости компании // Новая постиндустриальная волна на Западе / под редакцией В. Л. Иноземцева. М. : Academia, 1999.

10. Климов С. М. Интеллектуальные ресурсы организации. СПб. : Об-во «Знание» Санкт-Петербурга и Ленингр. обл., 2000.

N. G. Agafonova

INTELLECTUAL POTENTIAL: ESSENCE, FEATURES OF REPRODUCTION

The theoretical approachs to the determination of concept of intellectual potential of enterprise is summerised. The place and the role of intellectual potential in the system of the intellectual provision of enterprise are defined in this article.

Keywords: intellectual providing of enterprise, intellectual resources of enterprise, intellectual capital of enterprise, intellectual potential of enterprise, intangible assets, reproduction.

© Агафонова Н. Г., 2011

УДК 330.322.3

Е. Ю. Алексеева, Ю. В. Ерыгин

ИНСТРУМЕНТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ

Предлагается матрица выбора стратегии социальных инвестиций, позволяющая более эффективно распределять инвестиции при имеющихся бюджетных ограничениях.

Ключевые слова: инструменты стратегического планирования, социальная сфера, инвестиционная деятельность, факторы, стратегии, показатели.

Экономические преобразования, происходящие в начале 1990-х гг., привели к изменениям во всех сферах жизни населения. Создание рыночной экономики в рамках происходящих перемен потребовало множества усилий, которые были направлены на разгосударствление предприятий и создание частной формы собственности, а также зарождение рыночных отношений, которые создали новые возможности для всех хозяйствующих субъектов. Стратегические цели экономических преобразований в первую очередь

были направлены на создание материальных предпосылок благоприятной и комфортной жизненной среды, соответствующих возможностям технического и социального прогресса; переход к новому типу экономического роста, ориентированному на удовлетворение потребностей различных групп населения; создание многоукладной и многосекторной экономики. При этом формирование социально-рыночного сектора отошло на задний план. Отсутствие интереса со стороны всех экономических агентов к социальной инфраструктуре породила множество проблем, которые сложно решить и по сей день.

На сегодняшний день разработано множество целевых программ, направленных на повышение качества жизненно важных отраслей. На реализацию этих программ заложены статьи расходов в государственном бюджете разных уровней. Но не создан такой механизм, который бы позволил эффективно распределить бюджетные средства [1]. Так, например, известно, что именно начальное образование приносит обществу наибольшие социально-экономические выгоды по сравнению с другими уровнями образования, правительство стремится обеспечить бесплатное начальное образование всем детям. Но государственные средства обычно распределяются неравномерно, так что наилучшие возможности для получения образования нередко получают городские дети, а не те которые живут в сельских районах.

Наиболее важными в обеспеченности жизни граждан страны являются показатели здравоохранения. Рассматривая эту сферу, стоит отметить тенденцию к сокращению обеспеченности средним медицинским персоналом, что происходит из-за неудовлетворенности условиями труда и низкого уровня оплаты. Наряду с сокращением среднего медицинского персонала уровень обеспеченности врачами лечебных учреждений возрастает, что объясняется увеличением спроса на высшее медицинское образование. Показатель, характеризующий уровень обеспеченности больничными койками из-за отсутствия недостаточного финансирования со стороны государства, снижается. Наблюдаются положительные изменения, так, например, уровень обеспеченности амбулаторно-поликлиническими учреждениями по сравнению с 1990 г. существенно возрос.

Иными словами, в результате оценки состояния социальной сферы в России были выявлены следующие результаты тенденции и закономерности:

– вследствие низкого уровня финансирования социальной отрасли произошло снижение уровня обеспеченности объектами социальной сферы;

– в связи с миграционными процессами, связанными с переселением людей из деревни в город, а также переселением населения из стран СНГ на территорию России, изменилась структура потребителей социальных услуг;

– низкий объем финансирования с минимальным процентом возобновления привел к высокому уровню износа по социальным объектам.

Данная ситуация подтверждается оценкой уровня социальной обеспеченности по Красноярскому краю. Также стоит заметить, что в последнее годы на развитие и поддержание социальной сферы выделяются средства из бюджетов различных уровней, разрабатываются и реализуются проекты, направленные на качественное улучшение жизни людей. Наряду с программами субъектов федерации существуют и федеральные программы. Однако выделяемых средств попрежнему недостаточно для развития социальной сферы. Ограниченность ресурсов актуализирует задачу эффективного распределения ограниченных бюджетных средств, направленных на цели социального развитии.

При анализе факторов, определяющих развитие объектов социальной сферы, был сделан вывод о неопределенности и непредсказуемости параметров социального развития. Так, нестабильность экономического развития выражается в возросшем количестве изменений как в хозяйственной жизни, так и в обществе в целом, причем уменьшается предсказуемость этих изменений. Это обуславливается меняющими потребностями общества относительно сферы социальных услуг. Факторы, которые сегодня являются определяющими в социальной сфере, завтра могут отойти на второй план. Высокий уровень рождаемости в 1980-х годах привел сегодня к острой нехватке мест в дошкольных учреждениях, а высокий уровень урбанизации в начале 1990-х годах привел к увеличению числа пациентов в медицинских учреждениях. Наличие альтернативных направлений инвестирования бюджетных средств требует детального расчета всех возможных вариантов, а отсутствие времени и средств превращают задачу распределения ресурсов в неразрешимую. Данная задача должна сводиться к тому, чтобы предвосхитить изменение факторов социальной инфраструктуры в перспективе и иметь комплекс инструментов реагирования на эти изменения. Поэтому решение возникшей задачи возможно только с использованием инструментов стратегического планирования.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены существующие методы стратегического планирования, и выполнена оценка возможности их использования применительно к социальной сфере. Основными и часто используемыми на сегодняшний день являются: матрица БКГ, матрица Мак-Кинси и др. В основе всех этих моделей лежат такие показатели как темпы роста, модель жизненного цикла, доля рынка и т. д. Однако указанные методы не могут быть использованы при решении задачи формирования стратегии социального развития, поскольку все эти методы и модели разработаны с учетом деятельности коммерческих организаций. В частности, существуют методы анализа факторов внешней и внутренней среды. Среди них метод «5×5», SWOT-анализ, метод четырех вопросов и др. Однако названные методы также не отражают условий функционирования социальной сферы. Учитывая специфику данной отрасли, был предложен метод «пяти вопросов», позволяющий вы-

явить наиболее значимые факторы развития социальной инфраструктуры. Данный метод включает следующие вопросы:

1. Каков уровень обеспеченности социальной сферы?

2. Каков потенциал развития финансирования социальной сферы в регионе?

3. Существует ли потенциал роста коммерческих инвестиций в определенные типы социальных объектов?

4. Каков характер информации об изменении уровня обеспеченности в будущем?

5. Каков потенциал роста дохода регионального бюджета в перспективе и наличие федеральных и краевых социальных программ в регионе?

Для выявления объектов, определяющих исследование, была проведена классификация учреждений социальной инфраструктуры. Данная классификация основана на ОКВЭД и ОКОНХ, которая в последнее время не действует, но представляет интерес для исследования [2]. Это позволило выделить пять социальных отраслей в той части, которая финансируется из бюджетов различных уровней. Учет условий финансирования позволяет выделить следующие объекты: здравоохранение, образование, социальную защиту, спорт и культуру.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо разработать инструменты, удовлетворяющие специфике объектов социальной сферы. Данные инструменты должны учитывать факторы, оказывающие влияние на выбор стратегического развития социальной инфраструктуры [3].

В результате исследования данного метода были выявлены 2 фактора, определяющие развитие социальной сферы, к ним относятся уровень обеспеченности и объем финансирования. Именно эти факторы были использованы при построении матрицы выбора стратегии социальных инвестиций. Данная матрица представляет 4 квадранта, отвечающих различным уровням обеспеченности и объему финансирования (см. рисунок). В каждом квадранте указаны соответствующие направления развития – выравнивание, доведение до международных стандартов, закрытие узких мест, доведение до нормативного уровня.

Для оценки уровня обеспеченности первым этапом необходимо определить уровень обеспеченности по каждому объекту в данной отрасли. Затем выполняется расчет среднего значения уровня обеспеченности по объектам этой же отрасли. Далее рассматриваем, как эти показатели соотносятся между собой. Если фактический уровень обеспеченности больше среднего значения уровня обеспеченности, т. е. $L_{\text{по } 1i} > L_{\text{ср}}$, то речь идет о высоком уровне обеспеченности. Если фактический уровень обеспеченности меньше среднего значения уровня обеспеченности, т. е. $L_{\text{по } 1i} < L_{\text{ср}}$, то речь идет о низком уровне обеспеченности [4].

Для оценки уровня финансирования следует учитывать объем средств, необходимый для доведения уровня обеспеченности до нормативного значения с учетом прогнозируемого периода, а также реальный объем выделяемых средств. Таким образом, оценка уровня финансирования будет определяться как отношение требуемого объема финансирования к фактическому объему финансирования. Полученный таким образом показатель сравниваем с единицей. В случае, когда отношение требуемого объема финансирования к реальному объему инвестиций больше 1, т. е. $\frac{V_{\text{фин.треб}}}{V_{\text{фин.факт}}} > 1,$ показатель следует считать низким.

В случае, когда отношение требуемого объема финансирования к реальному объему инвестиций меньше либо равно 1, т. е. $\frac{V_{\text{фин.треб}}}{V_{\text{фин.факт}}} \le 1,$ то показатель следует считать высоким.

Матрица социального развития

В четырех квадрантах матрицы содержатся следующие предписания, определяющие стратегии развития [5].

1. Доведение уровня обеспеченности до международных стандартов или социальных требований. Объекты, относящиеся к данному квадранту матрицы, характеризуются высоким уровнем обеспеченности при высоком объеме финансирования. Данный квадрант матрицы обеспечивается при устойчивой и эффективной социальной политики государства. Когда за основу берутся социальные стандарты жизни людей, обеспечивающие им комфортный и качественно высокий уровень жизни.

2. Стратегия выравнивания – это объекты, характеризуемые высоким уровнем обеспеченности при низком объеме финансирования. К ним этим относят недавно введенные в эксплуатацию объекты, реализуемые в рамках различных программ, направленных на развитие социальной сферы. Определяющим для них является будущее финансирование, так как при равномерном поступлении средств будут обеспечиваться высокие показатели обеспеченности в будущем.

3. Доведение до нормативного уровня – эти социальные объекты характеризуются низким уровнем обеспеченности при высоком объеме финансирования. Данная стратегия с учетом значительного объема инвестиций в объекты направлена на то, чтобы выровнять число показателей или довести уровень обеспеченности до нормативного уровня. В связи с тем, что объемы финансирования значительные, не придется ранжировать объекты по приоритетности. Выделяемые средства распределяются между объектами с низким уровнем обеспеченности.

4. Закрытие узких мест – низкий уровень обеспеченности объектов при низком уровне финансирования. Данная стратегия направлена на оценку эффективности социальных инвестиций при их распределении с учетом ранжирования объектов по степени их приоритетности.

Таким образом, предлагаемая матрица выбора стратегии социальных инвестиций позволит более эффективно распределять инвестиции при условии имеющихся бюджетных ограничений. Это, в свою очередь, позволит улучшить положение в социальной сфере, обеспечивающей соответствующий уровень благосостояния, услуг и качества жизни.

Использование предложенных методов позволяет определить стратегии социального развития, которые в свою очередь позволяют сократить размерность следующей задачи, связанной с оценкой эффективности социальных инвестиций и их последующим распределением.

Библиографические ссылки

1. Жирков С. Ф. Оценка эффективности инвестиций в развитие социальной инфраструктуры // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 9. Красноярск, 2003. С. 63–66.

2. Алексеева Е. Ю., Фирсова Т. В. Классификация объектов социальной инфраструктуры // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. С. 15–18.

3. Жирков С. Ф. Инструменты и методы оценки эффективности и формирования структуры социальных инвестиций : автореф. дис. … канд. экон. наук. Красноярск, 2006.

4. Фирсова Т. В. Принципы оценки эффективности инвестиций в социальную сферу // Тр. 5 Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 252–254.

5. Алексеева Е. Ю., Фирсова Т. В. Стратегия социального развития // Современные проблемы экономического и социального развития : межвуз. сб. науч. тр. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2007. Вып. 3. С. 56–57.

E. Yu. Alexeeva, Yu.V. Erygin

TOOLS OF STRATEGIC PLANNING OF SOCIAL INVESTMENTS

The matrix of a choice of strategy of the social investments, which allows to distribute investments according to available budgetary restrictions more effectively is offered in the article.

Keywords: tools of strategic planning, social sphere, investment activity, factors, strategies, indicators.

© Алексеева Е. Ю., Ерыгин Ю. В.. 2011

УДК 65.011.8

Г. П. Беляков, Д. В. Еремеев

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПОНЯТИЙ: ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕОСНАЩЕНИЕ, МОДЕРНИЗАЦИЯ*

Проводится анализ определения понятий «техническое перевооружение», «техническое переоснащение», «модернизация», определяется их сходство и различие. Предлагается ряд эмпирических критериев, позволяющих охарактеризовать основное содержание и направление внедрения вышеуказанных мероприятий при использовании в технологическом процессе предприятия.

Ключевые слова: модернизация, техническое перевооружение, техническое переоснащение.

Определения понятий «техническая модернизация», «техническое перевооружение» и «техническое переоснащение» нашли свое отражение в работах таких авторов как В. В. Острошенко, Л. Кураков, А. Азрилиян, Б. А. Райзенберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародупцева, А. П. Бочков, Д. П. Гасюк, Г. Н. Соколова, Ю. Любимцев, Э. Каллагов, С. Ф. Покропивный, М. А. Виленский, Б. П. Шарнопольский, так и во множестве отечественных и зарубежных словарей, энциклопедиях, учебниках, научных статьях и нормативных актах. Анализ определений данных понятий (табл. 1–3) показывает, что они не являются однозначными и часто не отделены друг от друга.

Модернизацию многие экономисты (В. В. Остошенко, Л. Кураков, А. Н. Азрилиян, Б. А. Райзенберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева) связывают с обновлением объекта, привидением его в соответствие с техническими требованиями и нормами (физический износ) [1–5]. Однако если данные авторы определяют модернизацию как следствие только физического износа, то авторы бизнес-словаря 2001 г. приводят следующее определение: «Модернизация – усовершенствование, улучшение, обновление машин, оборудования, технологических процессов в соответствии с новейшими достижениями науки и техники, требованиями и нормами, техническими условиями», откуда видно, что к физическому износу добавляется еще и моральный. То же видно и в работах А. Н. Азрилияна «Большой бухгалтерский словарь», «Словарь терминов по управленческому учету» (1998), «Большой экономический словарь». В рамках этих работ рассмотрим определение А. Н. Азрилияна: «Модернизация оборудования – частичное улучшение конструкции оборудования в целях увеличения производительности труда, облегчения условий труда, повышения качества продукции, изготовляемой на нем. Модернизация действующего на предприятии оборудования может выполняться самостоятельно, но чаще проводится с капитальным ремонтом его». Откуда видно, что модернизация определяется как частичное улучшение объекта, вследствие физического или морального износа, и направлена на повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда. Анализ определений понятия «модернизация» не позволяет выделить четко сформулированного и единого среди экономистов мнения.

В литературе к сожалению очень редко можно встретить определение понятия «техническое переоснащение», и практически все они связываются с понятием модернизации как составной части процесса. С. Ф. Покропивный определяет техническое переоснащение так: «Техническое переоснащение действующего предприятия означает осуществление его технического развития в соответствии с планом (без увеличения существующих производственных площадей), т. е. проведение комплекса мероприятий, предусматривающих повышение до современных требований технического уровня отдельных участков производства за счет внедрения новой техники и технологии, механизации и автоматизации производственных процессов, модернизации и замены физически и технически устаревшего оборудования». Откуда можно выделить основные составляющие, встречающиеся и у других авторов:

– техническое развитие без расширения производственных площадей;

– включает модернизацию оборудования;

– замена вследствие морального и физического устаревания.

В других определениях можно также встретить и на что направлен процесс переоснащения – это:

– улучшение организационной структуры производства, повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда. В Положении об авторском надзоре за строительством зданий и сооружений (Государственный комитет Украины по строительству и архитектуре, Киев, 2003);

– в процесс технического переоснащения включается усовершенствование общезаводского хозяйства и вспомогательных служб. В анализе определения «техническое переоснащение» прослеживается взаимосвязь с понятием модернизации, последнее является частью процесса переоснащения предприятия.

Определение понятия «техническое перевооружение» встречается в литературе чаще, чем определение понятия «техническое переоснащение», и в ряде работ они не отделены друг от друга. Например, рассмотрим понятие «перевооружение», которое предлагается в Письме Минфина СССР от 29.05.1984 № 80 (в ред. от 11.02.1986 г.) «Об определении понятий нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий».

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (код проекта Б.1.3.10).

Таблица 1

Анализ определений понятия «модернизация»

№ п/п	Определения	Комментарий
1	Модернизация – усовершенствование, улучшение, обновление объекта, приведение его в соответствие с новыми требованиями и нормами, техническими условиями, показателями качества. Модернизируются в основном машины, оборудование, технологические процессы [1]	Основное содержание – обновление объекта, приведение в соответствие с техническими требованиями и нормами (физический износ)
2	Модернизация (от фр. moderne – новейший, современный) – преобразование, усовершенствование чего-либо в соответствии с современными требованиями [2]	Основное содержание – то же, что и в пп. 1
3	Модернизация – усовершенствование, улучшение, обновление машин, оборудования, технологических процессов в соответствии с новейшими достижениями науки и техники, требованиями и нормами, техническими условиями [3]	Основное содержание – обновление объекта вследствие физического (то же, что и в пп. 1, 2) и морального износа
4	Модернизация (от греч. modeme – новейший) – усовершенствование, улучшение, обновление объекта, приведение его в соответствие с новыми требованиями и нормами, техническими условиями, показателями качества [4]	Основное содержание – то же, что и в пп. 1, 2
5	Модернизация оборудования – частичное улучшение конструкции оборудования в целях увеличения производительности, облегчения условий труда и повышения качества продукции, изготовляемой на нем. Модернизация действующего на предприятиях оборудования может выполняться самостоятельно, но чаще производится с капитальным ремонтом [5]	Основное содержание: – частичное улучшение объекта, вследствие физического или морального износа; – повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда
6	Модернизация (BETTERMENT) – проведение работ по замене оборудования или отдельных узлов на новые и более эффективные. Как правило, вызвано моральным износом оборудования. Задачей проведения работ по модернизации является продление срока эксплуатации актива, повышение качества или количества готовой продукции, снижение расходов на обслуживание актива [6]	Основное содержание: – частичное (то же, что и в пп. 5) либо полное улучшение объекта, вследствие морального износа; – повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда (то же, что и в пп. 5)
7	Модернизация. Затраты производимые в целях улучшения первоначально принятых нормативных показателей функционирования объекта основных средств. В результате проведенной реконструкции или модернизации организацией пересматривается срок полезного использования по этому объекту (п. 20 ПБУ 6/01) [7]	Основное содержание – частичное улучшение объекта (то же, что и в пп. 5)
8	Модернизация (от фр. Moderniser от moderne – современный) – ввод усовершенствований, отвечающим современным требованиям [8, с. 503]	Основное содержание – то же, что и в пп. 1
9	Модернизация оборудования – частичное улучшение конструкции оборудования в целях увеличения производительности труда, облегчения условий труда повышения качества продукции, изготовляемой на нем. Модернизация действующего на предприятии оборудования может выполняться самостоятельно, но чаще проводится с капитальным ремонтом [8, с. 503]	Основное содержание: – частичное улучшение объекта, вследствие физического или морального износа (то же, что и в пп. 5); – повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда (то же, что и в пп. 5)
10	Модернизация (от греч. Moderne – новейший) – усовершенствование, улучшение, обновление объекта, приведение его в соответствие с новыми требованиями и нормами, техническими условиями, показателями качества. Модернизируется в основном машины, оборудование, технологические процессы [9, с. 226]	Основное содержание – то же, что и в пп. 1

Основное содержание определения встречается в большинстве источников и представляет собой основное содержание также и понятия технического переоснащения (см. выше):

– повышение технического уровня существующего оборудования;

– включает модернизацию оборудования;

– усовершенствование общезаводского хозяйства и вспомогательных служб.

Замена может быть вследствие морального и/или физического устаревания.

Тем не менее, эти определения неотделимы лишь в некоторых источниках, дальнейшее проведение анализа показывает, что понятие технического перевооружения несколько шире и по существу переоснащение является составной частью процесса перевооружения. Л. В. Артемова в определении к выше перечисленным критериям добавляет: «Техническое развитие структуры производства происходит в соответствии со стратегией фирмы». Б. А. Райзенберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева связывают перевооружение с повышением технического уровня производства с расширением площадей (замена морально

устаревшего оборудования и/или внедрение нового оборудования).

Для того чтобы более четко идентифицировать и разграничить эти понятия, был выработан ряд эмпирических критериев, характеризующих основное содержание и направление вышеуказанных мероприятий на технологический процесс предприятия.

После анализа определения «модернизация» можно сделать вывод, что наиболее четко определение дается в 1 и 5 из предложенных вариантов. Остальные определения либо полностью, либо частично дублируют выбранные варианты.

Анализ позволяет сделать вывод, что 2 и 3 определения частично совпадают с 1 определением.

Таблица 2

Анализ определений понятия «техническое переоснащение»

№ п/п	Определения	Комментарий
1	Техническое переоснащение действующего предприятия означает осуществление его технического развития в соответствии с планом (без увеличения существующих производственных площадей), т. е. проведение комплекса мероприятий, предусматривающих повышение до современных требований технического уровня отдельных участков производства за счет внедрения новой техники и технологии, механизации и автоматизации производственных процессов, модернизации и замены физически и технически устаревшего оборудования [10]	Основное содержание: – техническое развитие без расширения производственных площадей; – включает модернизацию оборудования; – замена вследствие морального и физического устаревания
2	Техническое переоснащение – это комплекс мероприятий по повышению до современных требований технического уровня отдельных участков производства, агрегатов, установок на основе внедрения новой техники и технологии, механизации и автоматизации производственных процессов, модернизации и замены устаревшего, физически изношенного оборудования новым, более производительным; проведение мероприятий по устранению узких мест, улучшению организации и структуры производства, направленных на обеспечение прироста продукции, улучшение ее качества, повышение производительности труда, снижение металлоемкости и энергоемкости производства. Разработка проектов реконструкции технологических линий и участков – процесс более сложный, чем проектирование нового производства (см.: URL: Http://www.uves.ru/articles/62/58)	Основное содержание: – техническое развитие отдельных участков (то же, что и в пп. 1); – включает модернизацию оборудования (повторяет пп. 1); – замена вследствие физического устаревания (то же, что и в пп. 1); – улучшение организационной структуры производства, повышение качества и/или количества продукции и увеличение производительности труда
3	Комплекс мероприятий по улучшению технико-экономического уровня отдельных производств, цехов и участков на основании внедрения передовой техники и технологии, механизации и автоматизации производства, модернизации и замены устаревшего и физически изношенного оборудования новым, более производительным, а также усовершенствованию общезаводского хозяйства и вспомогательных служб. Техническое переоснащение предприятий выполняется, как правило, без расширения производственных площадей на основании проектов и смет на отдельные объекты или виды работ [11]	Основное содержание: – техническое развитие отдельных участков (то же, что и в пп. 1, 2); – включает модернизацию оборудования (то же, что и в пп. 1, 2); – замена вследствие морального и физического устаревания (то же, что и в пп. 1); – усовершенствование общезаводского хозяйства и вспомогательных служб

Таблица 3

Анализ определений понятия «техническое перевооружение»

№ п/п	Определение	Комментарий
1	Комплекс мероприятий, предусматриваемый в стратегических планах развитие фирмы по улучшению организации и структуры производства, устранению узких мест совершенствования общезаводского хозяйства и вспомогательных служб; по повышению технического уровня агрегатов, установок, внедрению новой техники и технологии и т. д. (см.: URL: http://employer.srochno.ua/professions/finansy/1723)	Основное содержание: – техническое развитие структуры производства в соответствии со стратегией фирмы; – повышение технического уровня существующего оборудования и внедрение нового; – усовершенствование общезаводского хозяйства и вспомогательных служб; – замена может быть вследствие морального и/или физического устаревания
2	Комплекс мероприятий, направленных на повышение технического уровня производства за счет внедрения более совершенной техники, технологии и организации работ в основном и вспомогательном производствах [9]	Основное содержание – повышение технического уровня производства (то же, что и в пп. 1), (замена морально устаревшего оборудования и/или внедрение нового оборудования, т. е. расширение площадей)

Окончание табл. 3

№ п/п	Определение	Комментарий
3	К техническому перевооружению действующих предприятий относится комплекс мероприятий по повышению технико-экономического уровня отдельных производств, цехов и участков на основе внедрения передовой техники и технологии, механизации и автоматизации производства, модернизации и замены устаревшего и физически изношенного оборудования новым более производительным, а также по совершенствованию общезаводского хозяйства и вспомогательных служб [12]	Основное содержание: – повышение технического уровня существующего оборудования (то же, что и в пп. 1); – включает модернизацию оборудования; – усовершенствование общезаводского хозяйства и вспомогательных служб (то же, что и в пп. 1); – замена может быть вследствие морального и/или физического устаревания (то же, что и в пп. 1)
4	Техническое перевооружение – комплекс мероприятий по повышению технико-экономического уровня отдельных производств, цехов и участков на основе внедрения передовой техники и технологии, механизации и автоматизации производства, модернизации и замены устаревшего и физически изношенного оборудования новым, более производительным, а также по совершенствованию общезаводского хозяйства и вспомогательных служб (см.: URL: http://mirslovarei.com/content_eco/texnicheskoe-perevooruzhenie-53321.html)	Основное содержание – то же, что и в пп. 3
5	Техническое перевооружение предприятия – комплекс мероприятий, направленных на повышение технического уровня производства за счет внедрения более совершенной техники, технологии и организации работ в основном и вспомогательном производстве (см.: URL: http://mirslovarei.com/content_eco/texnicheskoe-perevooruzhenie-predprijatija-17688.html)	Основное содержание – то же, что и в пп. 2
6	Техническое перевооружение фирмы – это комплекс мероприятий, предусматриваемый в стратегических планах развития фирмы по улучшению организации и структуры производства, по устранению узких мест совершенствования общезаводского хозяйства и вспомогательных служб; по повышению технического уровня агрегатов, установок, внедрению новой техники и технологии и т. д. [13]	Основное содержание – то же, что и в пп. 1
7	Техническое перевооружение производства состоит в том, чтобы в определенные сроки провести полную или частичную замену устаревшего оборудования и/ или технологии, с целью повышения производительности, снижения себестоимости и повышения качества готовой продукции (см.: URL: http://bestlog.narod.ru/conception.html)	Основное содержание – замена оборудования вследствие морального и/или физического износа (то же что и в пп. 1, 3)
8	Техническое перевооружение – комплекс мероприятий, направленных на повышение технико-экономического уровня деятельности предприятий, отдельных производств, цехов и участков за счет внедрения современной техники и прогрессивной технологии, механизации и автоматизации производственных процессов, модернизации и замены морально устаревшего и физически изношенного оборудования, улучшения организации и структуры производства, а также других организационных мероприятий без расширения производственных площадей и увеличения количества рабочих мест (см.: URL: http://www.stroygramota.ru/18_t/22.php)	Основное содержание: – повышение технического уровня существующего оборудования и внедрение нового, без расширения площадей; – замена может быть вследствие морального и/или физического устаревания (то же, что и в пп. 1, 3, 7); – включает модернизацию оборудования (то же, что и в пп. 3)
9	Техническое перевооружение предприятия – комплекс мероприятий, направленных на повышение технического уровня производства за счет внедрения более совершенной техники, технологии и организации работ в основном и вспомогательном производстве (см.: URL: http://www.stroygramota.ru/ 18_t/22.php)	Основное содержание – то же что и в пп. 2
10	Перевооружение действующих предприятий. Техническое перевооружение – комплекс мероприятий по повышению технико-экономического уровня отдельных производств, цехов и участков на основе внедрения передовой техники и технологии, механизации и автоматизации производства, модернизации и замены устаревшего и физически изношенного оборудования, новым более производительным, а также по совершенствованию общезаводского хозяйства и вспомогательных служб [8, с. 666]	Основное содержание – то же что и в пп. 3

Анализ определения «техническое перевооружение» показал, что 4 и 5 определения совпадают с 3 и 2 соответственно. Также можно отметить, что 1 и 2 определения более четко отражают данное определение.

В связи с данными анализами можно ввести следующие критерии:

1. Модернизация:

1.1. Физический износ.

1.2. Замена деталей узлов:

1.2.1. Новые.

1.2.2. Идентичные.

2. Перевооружение:

2.1. Комплекс: физический и моральный износ, установка дополнительного оборудования:

2.1.1. Применение нового оборудования, с расширением площадей.

2.1.2. Приведение технологий в соответствии с экологическими стандартам.

2.1.3. Изменение применяемых инструментов.

2.1.4. Изменение качества продукции.

2.1.5. Выпуск новой продукции.

2.2. Изменение квалификации персонала.

3. Переоснащение:

3.1. Изменение методов управления.

3.2. Замена оборудования вследствие морального износа.

3.2.1. Переналадка:

– приемов обработки;

– изменение режима работы;

– изменение последовательности технологического цикла.

3.2.2. Замена используемых материалов:

– замена комплектующих;

– замена материала.

3.2.3. Оснастка – введение дополнительного съемного оборудования.

По результатам разграничения данных понятий по критериям авторами были сделаны следующие выводы и допущения.

1. К *технической модернизации* можно отнести такой процесс усовершенствований, который сопряжен с заменой деталей на новые (как на идентичные прежним, так и на технологически новые) вследствие их физического износа.

2. К *техническому переоснащению* можно отнести замену оборудования вследствие морального износа. Данный процесс может проходить в трех формах: переналадка (в данном случае, изменению могут подвергаться, например, приемы обработки сырья и материалов, режим работы оборудования, а также последовательности технологического цикла), замена используемых материалов (сюда относятся как замена самих материалов, так и комплектующих для продукта) и оснастка (введение дополнительного съемного оборудования). Кроме этого, в понятие технического переоснащения включены изменения методов управления.

3. *Техническое перевооружение* включает в себя повышение технологического уровня производства, включающего в себя применение дополнительного нового оборудования (как в случае физического, так и морального износа). В ходе данного мероприятия либо будут применяться измененные инструменты при производстве старой продукции, либо изменится качество производимой продукции, либо же будет производиться выпуск совершенно новой продукции, либо все вместе взятое. Кроме этого, к понятию технического перевооружения можно относить изменение квалификации персонала в ходе процесса перевооружения и приведение технологий в соответствие с экологическими нормами и стандартами.

Таким образом, используя приведенную выше систему, можно однозначно отнести те или иные меры по изменению работы предприятия к определенной группе мероприятий – технической модернизации, техническому перевооружению либо техническому переоснащению, в зависимости от критериев, на которые данные меры будут влиять.

Дополнительно авторы хотели бы отметить, что для принятия решения о проведении техперевооружения, переоснащения или модернизации необходимо формировать портфель стратегии управления основными производственными средствами предприятия. Данный подход позволит оценить эффективность деятельности предприятия с целью вложения средств в наиболее прибыльные или перспективные направления и сокращения, или прекращения инвестиций в неэффективные проекты по замене основных средств.

Библиографические ссылки

1. Модернизация: многопредмет. науч. энцикл. [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki. Модернизация, свободный.

2. Острошенко В. В. Краткий словарь основных лесоводственно-экономических терминов. Уссурийск : ПГСХА, 2005.

3. Бизнес-словарь. М. : [б. и.], 2001.

4. Экономика и право : словарь-справочник / авт-сост.: К. Ф. Амиров, Л. П. Кураков. М. : ВУЗ И ШКОЛА , 2002.

5. Большой бухгалтерский словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. М., 2000.

6. Словарь терминов по управленческому учету. М., 1998.

7. Учет основных средств (ПБУ 6/01) : утв. Приказом Министерства финансов Российской Федерации от 30.03.01 г. № 26н.

8. Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. 5-е изд. доп. и перераб. М. : Ин-т новой экономики, 2002.

9. Райзенберг Б. А. Современный экономический словарь. 4-е изд., 5-е изд., перераб. и доп. М. : Инфра-М, 2006.

10. Покропивный С. Ф. Экономика предприятия : учебник : в 2 т. Т. 1. Киев : Хвиля-пресс, 1995.

11. Положение об авторском надзоре за строительством зданий и сооружений, государственный комитет Украины по строительству и архитектуре. Киев, 2003.

12. Об определении понятий нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий : письмо Минфина СССР от 29.05.1984 г. № 80 (ред. от 11.02.1986 г.) // Министерство финансов СССР.

13. Артемова Л. В. Инвестиции и инновации. Словарь-справочник от а до я. М. : Инфра, 1998.

G. P. Belyakov, D. V. Eremeev

STUDY OF CONCEPTS: TECHNICAL UPGRADING, RETOOLING, MODERNIZATION

The analysis of the definitions of the concepts of «technical upgrading», «retooling», «modernization», defined by their similarities and differences. Proposes a number of empirical criteria to characterize the substantive content and direction of implementation of the above activities when used in a process the company.

Keywords: modernization, technical upgrading, retooling.

© Беляков Г. П., Еремеев Д. В., 2011

УДК 330.142.211

А. А. Бойко, Е. С. Рыбакова

РОЛЬ ЛИЗИНГА В ОБНОВЛЕНИИ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФОНДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрены основные проблемы ракетно-космической промышленности. Обоснована необходимость использования лизинга для обновления основных производственных фондов.

Ключевые слова: ракетно-космическая промышленность, обновление, лизинг.

Россия является одной из немногих стран мира, обладающей уникальной ракетно-космической промышленностью, позволяющей создавать и поддерживать в необходимом состоянии ракетно-космическую технику широкого спектра назначения. Ракетно-космическая промышленность (РКП) является одной из ведущих отраслей оборонно-промышленного комплекса и промышленности России в целом. Ракетно-космическая промышленность является основой, обеспечивающей России поддержание оборонной и экономической безопасности страны. Она исторически создавалась как единая база для разработки, создания и серийного производства ракетно-космической техники (РКТ) оборонного и гражданского назначения, что обусловило:

– общность задач разработки, создания и эксплуатации боевой ракетной и ракетно-космической техники;

– идентичность технологий разработки, изготовления и использования боевой ракетной и ракетно-космической техники;

– общность конструкторских решений и развитие внутриотраслевой унификации;

– тенденцию к увеличению доли средств двойного назначения.

Предприятия ракетно-космической отрасли поставлены в особые условия:

– спрос на продукцию РКТ, поставляемую для государственных нужд оборонного и промышленного назначения, формируется государством, которое является монопольным потребителем;

– предприятия ракетно-космической промышленности работают в условиях госзаказа, но тесно связаны с гражданским коммерческим рынком в части материалов, комплектующих изделий, топливно-энергетических ресурсов и т. д.;

– цены на продукцию РКТ в рамках государственного заказа устанавливаются не рыночным путем (т. е. соотношением спроса и предложения), а в результате прямых переговоров и соглашений между государственными заказывающими органами и предприятиями [1].

Одной из основных задач РКП является создание ракетных комплексов стратегического назначения, являющихся составной частью потенциала ядерного сдерживания. Ракетно-космическая промышленность состоит их таких важнейших отраслей как производство баллистических ракет, ракет космического назначения и космических аппаратов – 21 % предприятий; ракетного двигателестроения – 9 % предприятий; производство агрегатов, наземной инфраструктуры и космического приборостроения 70 % предприятий. В настоящее время в состав ракетно-космической промышленности входят 100 предприятий и организаций.

Особенностями ракетно-космической промышленности являются:

– высокая наукоемкость, высокая технологичность производственных процессов и создаваемых изделий, высокие инновационные возможности. К отрасли относятся менее 8 % предприятий российского оборонного комплекса, но при этом в ней сосредоточено примерно 33 % работников научного сектора ВПК и объем производства научно-технической продукции достигает 35,7 %. В РКП преобладают научные и проектно-конструкторские организации – 68 против 34 производственных предприятий. Ракетно-космическая промышленность считается самой наукоемкой отраслью отечественного ВПК – структуру отрасли отличает преобладание научно-технической продукции над промышленной в соотношении 2:1;

– сложность, уникальность и высокая стоимость изделий. Стоимость американской межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) «Минитмен-III» составляет 33,5 млн долл., «МХ» – 189 млн долл. Стоимость баллистических ракет подводных лодок (БРПЛ) «Трайдент-I» и «Трайдент-II» составляет 37,4 и 65,2 млн долл. Примерная стоимость Российской БРПЛ «Булава» находится в пределах от 10 до 15 млн долл.;

– высокая степень принадлежности государству предприятий, входящих в состав отрасли. Почти 75 % предприятий ракетно-космической промышленности являются государственными унитарными. Акционерные общества (АО) без участия государства составляют менее 10 % от общего количества предприятий. Из остальных АО в 84 % государство имеет пакет выше блокирующего либо специальное право управления («золотую акцию»);

– зависимость от бюджетного финансирования и традиционно повышенное внимание государства к ее развитию. Государство, считая космос одним из своих приоритетов, покрывает значительную долю отраслевых потребностей развития (ассигнования идут в рамках различных федеральных целевых программ, прежде всего Федеральной космической программы, а также по линии гособоронзаказа), причем бюджетные вливания в РКП превышают размеры государственного финансирования всех других отраслей отечественного оборонного комплекса. Так, например, в рамках Федеральной космической программы на 2006–2015 гг., бюджетное обеспечение составляет 305 млрд руб. (486,8 млрд руб. – вместе с внебюджетными источниками). В 2007 г. для Радиоэлектронного комплекса (РЭК) была утверждена Федеральная целевая программа (ФЦП) «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 гг. Общий объем финансирования по программе составит 187 млрд руб. (средства федерального бюджета – 110 млрд руб., внебюджетные источники – 77 млрд руб.), что примерно в три раза меньше, чем в РКП. На развитие ракетно-космической промышленности в 2010 г. государство выделило 84,578 млрд руб.;

– неравномерное распределение входящих в нее предприятий по территории РФ. Более 80 % предприятий сосредоточены в трех федеральных округах: Центральном, Северо-Западном и Приволжском. Причем в Центральном расположены почти 60 % предприятий. По объемам производства лидирует Приволжский ФО, обеспечивающий до 40 % общего объема товаров и услуг. Также значимым для РКП является Сибирский федеральный округ, на который приходится более 20 % совокупных отраслевых объемов производства;

– широкая внутриотраслевая и межотраслевая кооперация, большое число соисполнителей в процессе проектирования, изготовления и испытания изделий. В процессе создания боевой ракетной и ракетно-космической техники принимает участие более 550 организаций смежных отраслей промышленности;

– малая серийность изделий в производстве. По данным, приведенным военными экспертами, ракетные войска стратегического назначения (РВСН) за период с 1992 по 1999 гг. получили 92 новых межконтинентальных баллистических ракет, а за период с 2000 по 2007 гг. было закуплено только 27 МБР.

Отечественная ракетно-космическая промышленность, в отличие от аналогичных промышленностей ведущих мировых ракетно-космических держав, создавалась в условиях жестко централизованной экономики, что позволило накопить научный, производственный, технологический потенциал, но не создало механизма функционирования РКП в рыночной экономике.

В настоящее время основными проблемами предприятий ракетно-космической промышленности являются неудовлетворительное состояние производственной базы, несоответствие темпов роста промышленной продукции объемам финансовых вложений, рост затрат на производство продукции, падение ее рентабельности и как следствие ухудшение финансового состояния.

Несмотря на наличие в ракетно-космической промышленности целого ряда серьезных проблем, именно состояние производственной базы предприятий, потеря технологий, высокий моральный и физический износ активной части основных производственных фондов (ОПФ), словом все то, что называется производственным потенциалом военно-промышленного комплекса (ВПК), вызывает наибольшую озабоченность как руководства комплекса, так и представителей основного заказчика – Минобороны России.

Военно-промышленный комплекс постепенно подходит к тому технологическому пределу, за которым через какое-то время может последовать невозможность решения ВПК основной стоящей перед ним задачи – обеспечения оборонной и промышленной безопасности государства. Свидетельством тому, что это не сгущение красок, а один из вполне вероятных вариантов развития событий, служит увеличивающееся с каждым годом количество рекламаций на поставленную продукцию, значительное удорожание контрактов (как для ВС РФ, так и по линии военно-технического сотрудничества), регулярные срывы сроков поставок или отказы от ранее принятых обязательств. Причины падения качества хорошо известны: мелкосерийность, отсутствие опыта эксплуатации производимой техники в войсках, что мешает выявлению и устранению недостатков, высокая степень износа активной части основных фондов, разрыв сложившихся кооперационных связей, кадровый кризис.

Ракетно-космическая промышленность является одним из лидеров по проценту изношенности ОПФ – 60 %, в то время как ежегодный темп обновления основных фондов снизился до уровня менее 1 % (при норме 7–10 %), в целом по предприятиям ракетно-космической промышленности износ основных фондов основного вида деятельности составляет 56–57 %, а машин и оборудования – около 77 %. Это средние цифры по РКП – в то же время фактически обновление идет лишь на предприятиях, связанных с зарубежными контрактами.

Из-за резкого замедления темпов воспроизводства основных фондов ухудшились возрастные параметры используемого производственного оборудования. Ракетно-космическая промышленность имеет самую неудовлетворительную возрастную структуру машин и оборудования среди всех отраслей ВПК (табл. 1).

Средний возраст машин и оборудования в РКП составляет 22 года. Доля нового оборудования до 10 лет минимальна – 2,2 % (1991 г. около 50 %) и наоборот, доля оборудования за пределом нормативного срока эксплуатации (20 лет) максимальна 70 %.

Кроме того, под угрозой утраты уникальные технологии космического машиностроения, так, на 14 обследованных предприятиях из 580 базовых и уникальных технологий требуют модернизации 300, под угрозой утраты – 100, полностью утрачены – 80.

Высокий физический износ и низкий технический уровень основных производственных фондов являются основной причиной низкой степени загрузки оборудования – около 30 %.

Низкая загрузка предприятий, выпускающих финальную продукцию, в большей степени отразилась на предприятиях, производящих комплектующие, что ставит под угрозу само существование этих предприятий. Снижение уровня государственного заказа и финансирования выявило проблему недиверсифицированности технологической структуры отрасли, 82 % мощностей которой были заняты только профильной продукцией [3]. Этого нет ни в одной ведущей космической корпорации мира. В новых условиях они оказались избыточными, причём навсегда. Требуются средства и время для оптимизации структуры всей отрасли, для интеграции производств.

В 1998 г. уровень загрузки производственных мощностей в ВПК снизился до минимального значения – 15 % (по сравнению с 74 % в дореформенный период). Очевидно, что полная загрузка такого устаревшего оборудования неизбежно приведет либо к его поломке, либо к потере качества выпускаемых изделий, а, скорее всего, и к тому, и к другому. Исходя из этого, существующий сегодня низкий средний уровень загрузки производственных мощностей предприятий ВПК является если не нормальным, то объективно обусловленным.

Таким образом, основными проблемами воспроизводства ОПФ предприятий РКП являются низкие темпы воспроизводства ОПФ, высокий физический и моральный износ оборудования, достигший критического уровня, и как, следствие, – низкий уровень загрузки мощностей.

По мнению большинства экспертов, одной из главных причин, сдерживающих рост эффективности воспроизводства ОПФ, является недостаток инвестиционных ресурсов как в ВПК в целом, так и в РКП.

В настоящее время российские промышленные предприятия в основном лишились прежних источников инвестиционных ресурсов. Так, например, государственная поддержка предприятий в настоящее время постоянно снижается. С развитием рыночных отношений появилось множество новых способов формирования инвестиционных ресурсов воспроизводства ОПФ (например, эмиссия акций, ускоренная амортизация, лизинг и др.). Однако многие новые источники, широко используемые компаниями в странах с развитой рыночной экономикой, продолжают оставаться недоступными для российских предприятий, вследствие неразвитости инфраструктуры фондового рынка, высокой стоимости и краткосрочности привлечения инвестиционных ресурсов.

Но несмотря на это, ряд экспертов видят решение вышеперечисленных проблем в использовании механизма лизинга, вплоть до создания лизинговой компании с участием частного капитала и средств федерального бюджета.

По данным опроса топ-менеджеров российских лизинговых компаний на рисунке представлена эффективность лизинга как инструмента промышленной политики с точки зрения модернизации экономики [4].

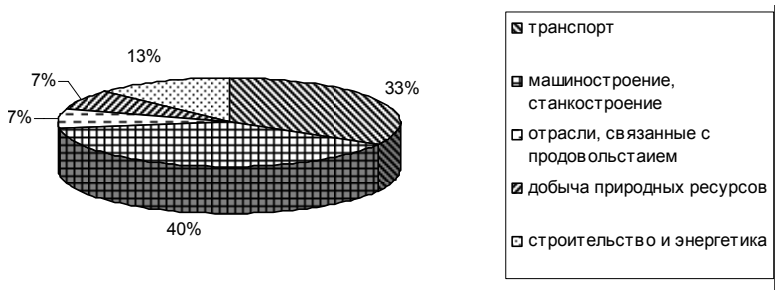
Посмотрев на рисунок, можно сказать, что лизинг наиболее эффективен в машиностроении и станкостроении – 40 %. Соответственно такая же эффективность будет и в РКП. Эффективность в транспорте составила 30 %. Наименее эффективен лизинг в отраслях, связанных с продовольствием и добычей полезных ископаемых.

По словам Троценко (президента Объединенной судостроительной корпорации), в этом году заработала программа лизинга, выделены кредиты под лизинг. Самым активным банком является ВЭБ, который через свою компанию «ВЭБ-лизинг» на сегодняшний день прокредитовал около 4 млрд руб. судостроительных контрактов. Объем поддержки лизинга в 2010 г. составил 2,7 млрд руб. По мнению Троценко, задача не увеличить объем, а сделать его длительным – в размере 3 млрд руб. в течение 10 лет. На сегодняшний день формула выглядит таким образом: один рубль дает судовладелец, один рубль дает «ОСК» по льготному лизингу и один рубль – банк.

Таблица 1

Возрастная структура машин и оборудования по отраслям ВПК (%) [2]

	ВПК	АП	РКП	ПВ	БП	СП	РЭК
Все оборудование (на конец года)	100	100	100	100	100	100	100
из него в возрасте, лет: до 5	9,2	18	0,5	3,8	7	1,8	11
5–10	9,3	9,2	1,7	9	14	4,2	15
10–20	36,3	38,1	27,8	31,8	40	37	44
более 20	45,2	34,7	70	55,4	39	57	30
Средний возраст оборудования, лет	17	15,5	22	19	17	20	15,5



Эффективность лизинга как инструмента промышленной политики с точки зрения модернизации экономики

На сегодняшний день лизинг является одним из основных источников инвестиционных ресурсов, позволяющих осуществлять крупномасштабные капитальные вложения в развитие материально-технической базы любого производства. Предприятия РКП нуждаются в быстром переоснащении основных средств для стимуляции роста производства. А лизинг для них является самым перспективным источником инвестиционных ресурсов по сравнению с другими и имеет ряд существенных преимуществ:

– лизинг дает возможность предприятию арендатору расширить производство и наладить обслуживание оборудования без крупных единовременных затрат и необходимости привлечения заемных средств;

– смягчается проблема ограниченности ликвидных средств, затраты на приобретение оборудования равномерно распределяются на весь срок действия договора, высвобождаются средства для вложения в другие виды активов;

– сохранение кредитной привлекательности предприятия за счет оптимального соотношения собственного и заемного капитала.

Однако следует отметить, что, как и любой источник инвестиционных ресурсов, лизинг имеет негативные стороны:

– в результате научно-технического прогресса используемое имущество морально устаревает, в то время как лизинговые платежи не прекращаются до окончания контракта;

– стоимость оборудования, приобретенного по договору лизинга, как правило выше, чем стоимость этого же оборудования у поставщика. Поэтому считается, что стоимость лизинга больше, чем стоимость кредита. Но это вполне объяснимо, поскольку лизингодатель компенсирует стоимость оборудования за счет лизинговых платежей на протяжении длительного периода времени, значительно превышающего сроки кредитования, а деньги во времени обесцениваются, к тому же риск устаревшего оборудования ложится на лизингодателя, и поэтому он берет большую комиссию;

– повышается сложность организации сделки.

По мнению экспертов, наиболее оптимальным видом лизинга для машиностроения, в том числе и для РКП, является классическая форма финансового лизинга с минимальной остаточной стоимостью. Оборудование амортизируется за короткий срок. Предприятие пользуется всеми преимуществами лизинга. Возвратный лизинг интересен для российских предприятий РКП. Однако получение финансирования по возвратному лизингу сопряжено с некоторыми сложностями, и в основном лизинг предоставляется тем клиентам, которые уже имеют положительную кредитную историю в лизинговой компании. Об оперативном лизинге еще рано говорить. В конце срока такой формы лизинга оборудования имущество остаётся в собственности лизинговой компании, тем самым уменьшая стоимость самой сделки. Имущественные риски для лизинговой компании очень велики – предприятия машиностроительной отрасли пока не идут на такие формы сотрудничества с лизинговой компанией как обратный выкуп имущества. Заниматься реализацией машиностроительного оборудования, вышедшего из лизинга таким образом, чтобы обеспечить прибыль от продажи оборудования и положительно «закрыть» договор лизинга у лизинговой компании возможности нет [5].

Экономическая нестабильность в стране негативно отразилась на деятельности лизинговых компаний, хотя в 2009 г. можно отметить некоторые тенденции к улучшению ситуации на лизинговом рынке. Основные индикаторы рынка лизинга представлены в табл. 2 [3].

Согласно статистическим данным, середина 2009 г. стала переломным моментом для рынка лизинга. После стремительного сокращения объемов лизинга, рынок начал вновь оживать. В результате к концу года объем полученных лизинговых платежей составил около 320 млрд руб. Объем нового бизнеса по итогам 2009 г. составил 315 млрд руб.

Возобновление активности в лизинговом секторе происходило на фоне общего усиления инвестиционных процессов и роста промышленного производства. Инвестиции в основной капитал за 2009 г. составили 7 трлн 539,9 млрд руб. (на 17 % меньше, чем в 2008 г.). Объем сделок с оборудованием в 2009 г. составил 47,01 млрд руб., уменьшившись вдвое. Число заключенных контрактов также сократилось почти в два раза. При этом средняя стоимость договора уменьшилась с 9,05 до 8,5 млн руб. Сложности с открытием крупных кредитных линий способствовали переориентации спроса лизингополучателей на более дешевые и быстроокупаемые предметы лизинга.

Стабилизация финансовых рынков, снижение ставок по кредитам, прекращение роста просроченной задолженности – все эти факторы обусловили оживление на рынке лизинга в конце 2009 г.

Таблица 2

Индикаторы развития рынка лизинга

Показатели	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Объем нового бизнеса, млрд руб.	399,6	997,5	720	315
Темпы прироста, %	83,8	149,6	–27,8	–56,2
Объем полученных лизинговых платежей, млрд руб.	136	294	402,8	320
Темпы прироста, %	78	116,2	37	–20,6
Объем профинансированных средств, млрд руб.	201,1	537	442	154
Темпы прироста, %	90	167	–17,7	–65
Совокупный портфель лизинговых компаний, млрд руб.	530	1 202	1390	960
Темпы прироста, %	–	126,8	15,6	–31
Номинальный ВВП России, млрд руб. (по данным Росстата)	26 903,5	33 111,4	41 256	39 016,1
Доля лизинга в ВВП, %	1,49	3,01	1,75	0,81

Согласно опросу, проведенному Росстатом в конце 2009 г., почти 2/3 (62 %) руководителей российских компаний в 2010 г. увеличили объем инвестиций в основной капитал. Поэтому возможно, что при отсутствии внешних шоков и позитивном развитии экономики объем рынка лизинга вырастет в 2011 г. на 30–40 %. Большинство гендиректоров лизинговых компаний считает, что восстановление рынка до уровня 2007 г. произойдет не ранее 2012 г. [6].

Главной тенденцией рынка лизинга в последнее время становится явное усиление конкуренции между лизингодателями. Так, ключевым событием 2005 г. был приход на российский рынок международных гигантов лизинга, таких как австрийский «ФБ Лизинг», итальянский «Локат Лизинг Руссия» (при банке Uni Credit), нидерландский «ИНГ Лизинг», французский Arval (при банке BNP Paribas) и латвийский «Па-рекс Лизинг». В то же время на рынок вышли и новые российские лизинговые компании. Рост конкуренции на рынке, безусловно, благоприятный фактор для лизингополучателей – у них есть возможность выбирать более выгодные условия для работы. Приход зарубежных гигантов – это не только «встряска» состава лидеров лизингового рынка, но и начало принципиально нового этапа развития российского рынка лизинга. Дело в том, что до сих пор лизинговые компании действовали преимущественно «под банками». Привлекая ресурсы от банков, они обслуживали отдельные сегменты рынка, по ряду причин труднодоступные для самих банков. Предоставляя кредит, банки часто оценивали как заемщика не лизинговую компанию, а конечного лизингополучателя. Это ставило лизинговые компании в неприглядное положение агентов при банках. Однако в течение последних лет постепенно сформировалась новая концепция лизингового бизнеса.

Ведущие лизинговые компании уже достигли таких объемов бизнеса, которые позволяют им выйти из подчиненного положения по отношению к банкам и конкурировать с ними на равных. Важнейшее значение в этом смысле имеет размер собственного капитала, поскольку он является главным ориентиром для инвесторов. По этому показателю многие лизинговые компании уже не уступают банкам. Другие важные показатели, такие как объем портфеля, региональная сеть, диверсификация источников финансирования у ряда ведущих лизингодателей, также уже не хуже, чем у банков. Приход иностранных лизинговых компаний закрепляет эту тенденцию. С одной стороны, потому что эти компании сами – крупные игроки, способные на равных конкурировать с банками, с другой – потому что их приход стимулирует дальнейшее укрупнение российских лизинговых компаний. Высокая надежность лизинговых сделок, независимость компаний от банков, значительная конкуренция, экономия на масштабе у крупных лизингодателей уже скоро приведут к тому, что условия лизинга в среднем будут значительно выгоднее условий кредитов [7].

Однако, среди основных причин, сдерживающих дальнейшее развитие лизинга в России, эксперты выделяют следующие проблемы: высокий процент коммерческого кредита – 42,6 %, недостаток финансовых средств – 41,4 % и несовершенство нормативно-правового регулирования лизинговой деятельности – 40,7 % (табл. 3).

Так, финансовый кризис заставил банки ужесточить условия кредитования. Некоторые включают в договор пункт о возможности увеличения ставки по кредиту. Отрицательно на объем лизинговых операций повлияло повышение ставки по выдаваемым кредитам в связи с ростом ставки ЦБ РФ.

Сложности в РКП, как и везде, практически одинаковы: слабая ликвидность и количество активов предприятий, преобладание «серой» и управленческой отчетности, чрезмерная кредиторская задолженность предприятия, отрицательный оборотный капитал – все эти факторы препятствуют финансированию таких предприятий.

Другой проблемой является практика налогового администрирования. Речь идет, прежде всего, о проблемах с возмещением НДС лизингодателям. Специфика лизинговой деятельности состоит в разовой оплате поставщикам техники и многолетней рассрочке по поступающим лизинговым платежам. Это приводит к тому, что у лизинговых компаний по итогам налоговых периодов возникает превышение уплаченного поставщикам налога на добавленную стоимость над суммами налога, полученными ими в составе лизинговых платежей и начисленными к уплате в бюджет. По общему правилу, установленному Налоговым кодексом, налогоплательщику предоставляется право зачесть сумму налога, предъявленную поставщиком, и потребовать возврата из бюджета суммы превышения.

Таблица 3

Факторы, влияющие на деятельность организаций в области финансового лизинга (по материалам обследований деловой активности организаций, осуществляющих деятельность в области финансового лизинга; в процентах от общего числа организаций) [8]

Факторы	Годы				
	2005	2006	2007	2008	2009
Недостаток финансовых средств	14,8	20,0	16,7	41,4	14,8
Сложность с получением кредита	12,6	22,0	20,3	34,3	22,4
Конкуренция со стороны других организаций, осуществляющих лизинговую деятельность	18,2	25,4	24,7	12,1	9,6
Высокий процент коммерческого кредита	77,0	42,0	28,3	42,6	87,2
Существующий уровень налогообложения	63,1	45,7	41,8	24,7	11,6
Несовершенство нормативно-правового регулирования лизинговой деятельности	60,5	59,1	50,7	40,7	75,2

Причем подчеркнем, проблема носит не столько правовой, сколько правоприменительный характер, так как в 90 % судебных случаев суд все равно принимает сторону лизинговой компании. Однако налоговые органы под различными предлогами стремятся отказать лизинговым компаниям в праве возмещения НДС [9].

Кроме вышеперечисленных проблем, можно выделить то, что лизинговые компании все еще испытывают серьезные трудности с возвратом оборудования в случае нарушения лизингополучателем условий договора лизинга. За редким исключением лизингодатели по-прежнему не верят, что суды смогут защитить их право собственности. Существующая юридическая система и судебная практика, с учетом склонности судов принимать решения в пользу должника приводят к сокращению доступности кредитов для всех потенциальных заемщиков. Укрепление уверенности кредиторов (включая, в первую очередь, лизингодателей) в том, что их права будут защищены, является главным условием обеспечения дальнейшего роста кредитования.

Также сама лизинговая отрасль все еще относительно невелика, ей не хватает хорошо подготовленных профессионалов, и, кроме того, лизинговый механизм не совсем понятен потенциальным лизингополучателям (т. е. всем предприятиям и предпринимателям).

Рост рынка лизинга оборудования также серьезно ограничен неразвитостью вторичных рынков оборудования. Это создает большие трудности для лизинга, так как ни лизингополучатель, ни лизингодатель не испытывают доверия к остаточной (или перепродажной) стоимости лизингового оборудования. До тех пор, пока вторичный рынок оборудования не будет достаточно развит, лизингополучатели не смогут в полной мере оценить преимущества лизинга. На это уйдет больше всего времени, так как вторичные рынки, как часть лизингового рынка, традиционно развиваются в последнюю очередь. Кроме того, огромные масштабы технологического переоснащения в России в ходе замены старого оборудования (часто по частям в связи с нехваткой денежных средств) означают, что прогноз будущих рыночных цен на оборудование скорее сродни гаданию на кофейной гуще, чем науке. Некоторые поставщики начали решать эту проблему, предоставляя российским лизинговым предприятиям «гарантии выкупа», принимая на себя часть риска.

Таким образом, несмотря на существующие проблемы, улучшение макроэкономической ситуации в стране и на рынке лизинга дает возможность предприятиям РКП использовать лизинг как источник инвестиционных ресурсов для обновления ОПФ.

Библиографические ссылки

1. Стратегия развития ракетно-космической промышленности на период до 2015 г. : выдержка [Электронный ресурс]. URL: http://www.vpk.ru/cgi-bin/uis/w3.cgi/CMS/Item/2540031#5.

2. Промышленность России. 2005 : сб. стат. М. : Росстат, 2006.

3. Рынок лизинга в 2009 г. [Электронный ресурс]. URL: http://raexpert.ru/researches/leasing/leasing2009/part1/.

4. Бородская Е. Лизинг поднимается с колен 19.08.2010 г. [Электронный ресурс] // Банковское обозрение. URL: /http://bo.bdc.ru/2010/8/lising.htm.

5. Лизинг в машиностроение [Электронный ресурс]. URL: http://nomos-leasing.ru/press-center/smi/2242/.

6. Рослизинг : обзор рынка лизинга по итогам 2009 г. (05 апреля 2010 г.) [Электронный ресурс]. URL: http://www.all-leasing.ru/analitic/detail/549616/.

7. Лизинг в России – тенденции и перспективы [Электронный ресурс]. URL: http://financial-lawyer.ru/topicbox/leasing/143-239.html.

8. Инвестиционная деятельность в России: условия, факторы, тенденции: 2009 [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/wps/PA_1_0_S5/Documents/jsp/Detail_default.jsp?category=1112178611292&elementId=1140095471812.

9. Горьков А. Прошедший год стал для компании «Сбербанк Лизинг» годом больших перемен : 16.07.2010 [Электронный ресурс]. URL: http://www.banki.ru/products/leasing/news/interview/?id=2084554.

A. A. Boiko, E. S. Rybakova

LEASING ROLE IN RENEWAL OF BASIC PRODUCTION CAPITAL FUNDS OF SPACE-ROCKET INDUSTRY ENTERPRISES

The authors describe the basic problems of space-rocket industry. Necessity of leasing use for renewal of basic production capital funds is proved.

Keywords: space-rocket industry, leasing, renewal.

© Бойко А. А., Рыбакова Е. С., 2011

УДК 332.14 (57)

В. А. Бубнов

ФОРМИРОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ ЧЕРЕЗ ЛИЗИНГОВЫЕ ОПЕРАЦИИ

Рассматривается применение государственно-частного партнерства в Российской Федерации как инструмента, позволяющего учесть интересы всех участников экономики: общества, бизнес-структур и государства. Предлагается осуществлять государственно-частное партнерство через лизинг как наиболее приемлемую форму экономических отношений.

Ключевые слова: региональная экономика, государственно-частное партнерство, социально-экономическое развитие, лизинговые операции, региональная безопасность.

Переход к рыночной экономике и отказ от командно-административного регулирования экономики потребовали новых форм взаимоотношений общества и государства.

Экономический кризис 2008 г. поставил под сомнение идею свободной рыночной экономики. Банкротство ведущих финансово-экономических институтов в Соединенных Штатах Америки, Юго-Восточной Азии и Западной Европы потребовало широкого вмешательства государства в национальную экономику во многих странах мира.

Российская Федерация смогла преодолеть последствия кризиса и ставит задачи развития. По словам премьер-министра РФ В. В. Путина: «До конца текущего года Правительство утвердит долгосрочные стратегии для всех федеральных округов России. Их реализация должна придать импульс качественному подъёму российских территорий. С участием Внешэкономбанка сформированы специальные институты развития для отдельных регионов Российской Федерации, для Северного Кавказа например. Также уже в текущем году начнёт работу фонд прямых инвестиций для поддержки социально-экономических проектов на Дальнем Востоке и в Забайкальском крае.

Нам нужно повышать качество экономики и инвестиций, снижать зависимость от экспорта сырья, укреплять банковскую систему страны. Нужны эффективная поддержка предпринимательства, подавление коррупции, которая тянет нас назад и деморализует общество.

Россия должна стать по-настоящему конкурентоспособной страной. Это базовое требование и к государству, и к бизнесу, и к социальной сфере. Сейчас по такому показателю как производительность труда мы значительно отстаём от ведущих стран. За предстоящее десятилетие надо увеличить производительность труда минимум в 2 раза, а в ключевых отраслях российской экономики – в 3–4 раза, поднять долю инновационной продукции в общем объёме производства с сегодняшних 12 до 25–35 %. Кстати сказать, за предыдущий год (у нас отчёт всё-таки за 2010 г.) производительность труда выросла в 3,1 раза – в целом неплохой показатель.

По объёму ВВП Россия должна войти в число пяти ведущих мировых экономик мира, а по ВВП на душу населения на уровень более 35 тыс. долл. на человека. Это выше, чем сегодняшние показатели таких стран, как Франция и Италия. Я хочу подчеркнуть: именно сегодняшних показателей, они ведь тоже не стоят на месте. Нам нужно закрепить тенденции к стабилизации численности населения страны, обеспечить всем гражданам доступ к качественным услугам здравоохранения и образования, гарантировать достойные пенсии, сформировать массовый средний класс» [1].

Тем не менее, в настоящее время ведутся оживленные дискуссии по поводу окончания кризиса или о возможности его нового витка. В Российской Федерации крупный бизнес в 2010 г. смог фактически преодолеть последствия кризиса и готов приступить к дальнейшей скупке государственных компаний в ходе их приватизации или выкупа контрольных пакетов акций, о чем было заявлено 21 апреля 2011 г. в отеле Ritz-Carlton, где прошел XVIII Съезд Российского союза промышленников и предпринимателей.

Данная точка зрения прозвучала в докладе президента Российского союза промышленников и пред-

принимателей А. Н. Шохина «Предпринимательский климат в России: проблемы, тенденции, решения» [2].

В сложившейся ситуации возникает научно-практическая проблема: сформировать взаимоотношения общества, государства и бизнеса, учитывая интересы каждой из сторон.

Со стороны общества основным запросом является сохранение социальных стандартов, о которых заявлено в ст. 7 Конституции РФ [3]:

«1. Российская Федерация – социальное государство, политика которого направлена на создание условий, обеспечивающих достойную жизнь и свободное развитие человека.

2. В Российской Федерации охраняются труд и здоровье людей, устанавливается гарантированный минимальный размер оплаты труда, обеспечивается государственная поддержка семьи, материнства, отцовства и детства, инвалидов и пожилых граждан, развивается система социальных служб, устанавливаются государственные пенсии, пособия и иные гарантии социальной защиты».

Со стороны бизнеса также следующая ст. 8 Конституции [3] гласит:

«1. В Российской Федерации гарантируются единство экономического пространства, свободное перемещение товаров, услуг и финансовых средств, поддержка конкуренции, свобода экономической деятельности.

2. В Российской Федерации признаются и защищаются равным образом частная, государственная, муниципальная и иные формы собственности».

Для обеспечения вышеперечисленного государству необходимо осуществлять правильную социально-экономическую политику, что в начале XXI в. сделать достаточно сложно.

Конкуренция двух форм хозяйствования (социалистическая и рыночная), продолжавшаяся в течение XX в., закончилась победой рыночной экономики. Однако, в ходе этого соперничества, странам с рыночной экономикой пришлось использовать опыт СССР в социальной области, что позволило сформировать социальные стандарты.

В результате этого, страны с развитой рыночной экономикой стали проигрывать в глобальной экономической конкуренции с такими странами как Китайская народная республика, Бразилия, Индия, где уровень жизни в разы отстает от них.

Это породило новые формы конкурентной борьбы, далекие от традиционных методов: занижение курсов национальной валюты, покупка казначейских обязательств других стран, закрытие производства или наоборот вывод его из различных стран, незаконное копирование научно-технических достижений и передовых технологий, ведение боевых действий и т. д.

Российская Федерация в условиях глобализации мировой экономики не может остаться в стороне от этих процессов. В результате чего был подписан Указ Президента РФ № 537 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 г.» от 12.05.2009 г. [4], где озвучены основные приоритеты национальной безопасности, для чего Россия сосредоточивает свои усилия и ресурсы на следующих приоритетах устойчивого развития:

1) повышение качества жизни российских граждан путем гарантирования личной безопасности, а также высоких стандартов жизнеобеспечения;

2) экономический рост, который достигается прежде всего путем развития национальной инновационной системы и инвестиций в человеческий капитал;

3) наука, технологии, образование, здравоохранение и культура, которые развиваются путем укрепления роли государства и совершенствования государственно-частного партнерства;

4) экология живых систем и рациональное природопользование, поддержание которых достигается за счет сбалансированного потребления, развития прогрессивных технологий и целесообразного воспроизводства природно-ресурсного потенциала страны;

5) стратегическая стабильность и равноправное стратегическое партнерство, которые укрепляются на основе активного участия России в развитии многополярной модели мироустройства.

В вышеприведенных приоритетах национальной безопасности упомянуто государственно-частное партнерство. Далее в данном документе сказано: «В интересах обеспечения национальной безопасности в среднесрочной перспективе развиваются конкурентоспособные отрасли экономики и расширяются рынки сбыта российской продукции, повышается эффективность топливно-энергетического комплекса, расширяется использование инструментов государственно-частного партнерства для решения стратегических задач развития экономики и завершения формирования базовой транспортной, энергетической, информационной, военной инфраструктур, особенно в Арктической зоне, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке Российской Федерации».

Для практической реализации государственно-частного партнерства в Бюджетный кодекс РФ [5] были внесены положения об Инвестиционном фонде Российской Федерации (ст. 179.2):

«1. Инвестиционный фонд Российской Федерации – часть средств федерального бюджета, подлежащая использованию в целях реализации инвестиционных проектов, осуществляемых на принципах государственно-частного партнерства.

2. Бюджетные ассигнования Инвестиционного фонда Российской Федерации, не использованные в текущем финансовом году, направляются на увеличение размера Инвестиционного фонда Российской Федерации в очередном финансовом году и плановом периоде.

3. Порядок формирования и использования бюджетных ассигнований Инвестиционного фонда Российской Федерации устанавливается Правительством Российской Федерации».

Тем самым, фактически государство не только признало необходимость государственно-частного партнерства, но и осуществило финансовое обеспечение данной деятельности.

Ряд регионов закрепили положения о государственно-частном партнерстве в своих нормативных документах.

В Санкт-Петербурге приняли закон [6], где закрепили, что целями участия Санкт-Петербурга в государственно-частных партнерствах являются реализация социально значимых проектов в Санкт-Петербурге, привлечение частных инвестиций в экономику Санкт-Петербурга, обеспечение эффективности использования имущества, находящегося в собственности Санкт-Петербурга, повышение качества товаров, работ, услуг, предоставляемых потребителям.

Вновь создаваемые субъекты РФ пошли еще дальше и включили положения о государственно-частном партнерстве в уставы [7] (ст. 8):

«1. В крае поощряется хозяйственная инициатива, защищается право собственности, поддерживается добросовестная конкуренция, гарантируется свобода договоров, проводится политика частно-государственного партнерства в интересах устойчивого социально-экономического развития края.

2. Органы государственной власти края в пределах своей компетенции участвуют в экономической деятельности и регулируют ее исходя из общих интересов населения.

3. Органы государственной власти края содействуют установлению партнерства между работодателями и работниками и их объединениями».

Следовательно, в настоящее время существует серьезная нормативная база осуществления государственно-частного партнерства в стране. Вместе с тем, отсутствует механизм его практической реализации.

Автор предлагает использовать лизинг как экономический инструмент, позволяющий государству оставить в своей собственности имущество с одной стороны, а с другой – передать управление им бизнес-структурам.

Лизинг – совокупность экономических и правовых отношений, возникающих в связи с реализацией договора лизинга, в том числе приобретением предмета лизинга [8].

Лизинговая деятельность – вид инвестиционной деятельности по приобретению имущества и передаче его в лизинг [8].

В сложившейся мировой деловой практике существуют следующие формы лизинга:

– финансовый лизинг – срок договора лизинга приближается или равен сроку полезного использования имущества;

– оперативный лизинг – срок договора лизинга существенно меньше срока полезного использования имущества;

– возвратный лизинг – имущество выкупается лизингодателем у лизингополучателя и сдается ему по договору лизинга.

К сожалению, российское законодательство не использует этот опыт и лизинг превратился в России в финансовую аренду. В соответствии со ст. 665 Гражданского кодекса РФ [9]: «По договору финансовой аренды (договору лизинга) арендодатель обязуется приобрести в собственность указанное арендатором имущество у определенного им продавца и предоставить арендатору это имущество за плату во временное владение и пользование для предпринимательских целей. Арендодатель в этом случае не несет ответственности за выбор предмета аренды и продавца.

Договором финансовой аренды может быть предусмотрено, что выбор продавца и приобретаемого имущества осуществляется арендодателем».

С нашей точки зрения использование мирового опыта позволит использовать лизинг в качестве инструмента государственно-частного партнерства.

При этом предметом лизинга могут быть любые непотребляемые вещи, в том числе предприятия и другие имущественные комплексы, здания, сооружения, оборудование, транспортные средства и другое движимое и недвижимое имущество, которое может использоваться для предпринимательской деятельности. Предметом лизинга должно выступать имущество, созданное государством и необходимое для достижения поставленных стратегических целей развития на федеральном, региональном и муниципальном уровнях.

Субъектами лизинга при государственно-частном партнерстве будут являться:

– лизингодатель – государственное унитарное предприятие или муниципальное унитарное предприятие, которое за счет привлеченных и (или) собственных средств приобретает в ходе реализации договора лизинга в собственность имущество и предоставляет его в качестве предмета лизинга лизингополучателю за определенную плату, на определенный срок и на определенных условиях во временное владение и в пользование без перехода к лизингополучателю права собственности на предмет лизинга;

– лизингополучатель – физическое или юридическое лицо, которое в соответствии с договором лизинга обязано принять предмет лизинга за определенную плату, на определенный срок и на определенных условиях во временное владение и в пользование в соответствии с договором лизинга с учетом заключенного договора о государственно-частном партнерстве, а также обязано использовать его для достижения поставленных целей;

– продавец – физическое или юридическое лицо, которое в соответствии с договором купли-продажи с лизингодателем продает лизингодателю в обусловленный срок имущество, являющееся предметом лизинга. Продавец обязан передать предмет лизинга лизингодателю или лизингополучателю в соответствии с условиями договора купли-продажи. Продавец может одновременно выступать в качестве лизингополучателя в пределах одного лизингового правоотношения.

Для правового функционирования субъектов лизинга необходимо внести изменения в законодательство и разрешить выступать лизинговыми компаниями не только коммерческим организациям (резиденты Российской Федерации или нерезиденты Российской Федерации), выполняющим в соответствии с законодательством Российской Федерации и со своими учредительными документами функции лизингодателей, но и государственным унитарным и муниципальным предприятиям.

Учредителями таких лизинговых компаний (фирм) должны быть органы власти, которые наделяют их необходимым имуществом или помогают им привлекать средства юридических и (или) физических лиц (резидентов Российской Федерации и нерезидентов

Российской Федерации) для осуществления лизинговой деятельности в установленном законодательством Российской Федерации порядке.

Таким образом, можно создать реальный механизм государственно-частного партнерства через механизм лизинга, что позволит существенно повысить темпы роста региональной экономики, привлечь инвестиционные ресурсы и потенциал бизнес-структур для социально-экономического развития регионов России.

Библиографические ссылки

1. Путин В. В. Отчёт о деятельности Правительства Российской Федерации за 2010 [Электронный ресурс]. URL: http://premier.gov.ru/events/news/14898 (дата обращения 11.05.2011).

2. Шохин А. Н. Предпринимательский климат в России: проблемы, тенденции, решения [Электронный ресурс]. URL: http://рспп.рф/news/view/703 (дата обращения 11.05.2011).

3. Российская Федерация. Конституция Российской Федерации : принята всенародным голосованием 12.12.1993 : с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ № 6-ФКЗ от 30.12.2008 г.; № 7-ФКЗ от 30.12.2008 г.

4. Российская Федерация. Президент. Указы. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 г. : указ Президента РФ № 537 от 12.05.2009 г.

5. Российская Федерация. Бюджетный кодекс Российской Федерации № 145-ФЗ от 31.07.1998 г. : принят ГД ФС РФ 17.07.1998 г. : в ред. от 19.05.2010 г.

6. Российская Федерация. Законы. Об участии Санкт-Петербурга в государственно-частных партнерствах № 627-100 от 25.12.2006 г. : принят ЗС СПб 20.12.2006 : в ред. от 10.04.2008 г.

7. Российская Федерация. Устав Красноярского края № 5-1777 от 05.06.2008 г. : подп. Губернатором Красноярского края 10.06.2008 г.

8. Российская Федерация. Законы. О финансовой аренде (лизинге) : федер. закон № 164-ФЗ от 29.10.1998 г. : принят ГД ФС РФ 11.09.1998 г. : в ред. от 26.07.2006 г.

9. Российская Федерация. Гражданский кодекс Российской Федерации. Ч. II. № 14-ФЗ от 26.01.1996 г. : принят ГД ФС РФ 22.12.1995 г. : в ред. от 17.07.2009 г.

V. A. Bubnov

FORMATION OF STATE-PRIVATE PARTNERSHIP AT A REGIONAL LEVEL THROUGH LEASING OPERATIONS

Application of state-private partnership in the Russian Federation as the tool, allowing to consider interests of all participants of economy is considered: societies, business-structures and the states. It is offered to carry out state-private partnership through leasing, as the most comprehensible form of economic attitudes.

Keywords: regional economy, state-private partnership, social and economic development, leasing operations, regional safety.

© Бубнов В. А., 2011

УДК 61:376

А. Е. Гончаров

МЕТОДИКА ПОДСЧЁТА ПРИБЫЛИ ОТ АНГЛО-СИБИРСКОЙ ТОРГОВЛИ ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ В 1886–1899 гг.

Рассмотрены вопросы, связанные с торговлей по Северному морскому пути (СМП) в конце XIX в. между Британией и Сибирью. Разработана методика подсчёта прибыли от торговли по историческим источникам XIX вв.

Ключевые слова: Северный морской путь (СМП), компания «Феникс», компания «Синдикат Лейборн Попхэм», фрахт, торговля, «транспортная задача Монжа-Канторовича».

Изучая исторические вопросы, связанные с экономикой, исследователи неизбежно сталкиваются с проблемой их методологического разбора. В настоящее время, большинство исследователей либо обходит сугубо экономические вопросы, либо рассматривает их в социально-экономическом контексте. Оперируя историко-экономическим источником, исследователи выстраивают выводы на основе статистического материала. Историческая наука весьма консервативна, о чём говорит регулярное применение в исследованиях двух базовых парадигм: марксистско-формационной и цивилизационной. Если первая модель делает попытку систематизировать взаимоотношения в человеческом обществе именно на основе экономических принципов, то вторая, по сути, отрицает экономику как основную составляющую развития общества, рас-

сматривая её лишь как подчиненную часть единого целого.

Сочетать оба подхода пробовали многие исследователи. Наибольших успехов достигли представители «Школы анналов», которые стали применять каждую отдельную общественную науку в процессе исторического познания. Сами экономисты учитывают исторические вопросы в развитии экономики на микро и макро уровнях, но – этого недостаточно для моделирования полной картины тех или иных событий. Для того, чтобы составить представление, в том числе и о современной экономике, необходимо скрупулёзно изучить исторические процессы, повлиявшие на формирование мирового экономического пространства. Такое пространство впервые было создано Британской империей, которая к началу XX в. стала ведущей экономикой мира и оказывала влияние даже на такие отдалённые от мирового рынка регионы как Сибирь.

В настоящей статье рассмотрен один из значимых для развития экономики России вопросов – освоение Северного морского пути в конце XIX в. с позиции экономической теории. Тема СМП нашла широкое отражение в историко-географических и исторических работах как отечественных, так и зарубежных. Однако аспект её экономического освоения остался недостаточно изученным. Наиболее существенная попытка была сделана Д. М. Пинхенсоном в работе «История открытия и освоения Северного морского пути» [1]. Он затронул вопросы его хозяйственного и экономического освоения, но оставил их нераскрытыми, хотя именно эти факторы были катализаторами бурного развития Севера, начавшегося в конце XIX – начале XX вв. Наиболее ярким событием здесь было начало англо-сибирской торговли через СМП. Хотя это событие практически не изучалось историками Сибири и Севера, оно оказало огромное влияние на развитие Сибири.

С 1874 по 1899 гг. английские предприниматели впервые вступили в торговые отношения с населением Сибири. Толчком к этому послужили первые успешные плавания по Карскому морю к устьям Оби и Енисея, развитие техники (на смену парусникам пришли паровые суда) и установление Министерством финансов беспошлинной торговли с Сибирью по морю. Наиболее активный период плаваний имел место с 1886 по 1899 гг., когда начали функционировать две английские торговые компании: «Феникс» и «Лейборн Поппхэм». Англичане оказали большое влияние на сибирский внутренний рынок, завозя новые товары и создавая конкуренцию сибирской и российской буржуазии, которая до этого являлась здесь монополистами. Появилась надежда на ускоренное развитие страны по западному образцу. Многие представители сибирской интеллигенции и буржуазии видели в СМП новые возможности для активного вывоза за границу таких товаров, как древесина, графит, уголь, металлы, которые ранее не экспортировались по причине дороговизны транспортных перевозок. Понимание того, что Сибирь может торговать с Европой, минуя Европейскую Россию, усилило областнические и сепаратистские тенденции в сибирском обществе.

Несмотря на всю важность этого вопроса, он продолжает оставаться слабо изученным. Более того, показывая масштаб развития англо-сибирской коммерции, мы сталкивались с отказом некоторых историков признать факт его существенного влияния на социально-экономические процессы в Сибири. Камнем преткновения для нас оказалось то, что мы попросту не смогли представить конкретные экономические данные, в первую очередь, по прибыли. Дело в том, что архивы этих двух компаний либо утеряны, либо находятся в частных хранилищах, что делает их поиск практически невозможным. Это связано с тем, что порты приписки английских судов находились в Великобритании; не останавливаясь в портах Европейской России, суда направлялись в устья сибирских рек, где и производили разгрузку. Поскольку таможня в Енисейской и Томской губерниях была организована лишь в 1899 г., то таможенных отчётов нет. Таким образом, все данные находились исключительно в руках компаний.

Каким же образом решать данную проблему? Здесь нам помогут экономические методы, которые ранее не находили применения в истории торговли по СМП.

В качестве основного источника в нашем исследовании были использованы британские статистические отчёты за период с 1886 по 1899 гг., российские экономические отчёты («Торгово-промышленная газета»), постановления Министерства финансов.

Определив составляющие прибыли для морских торговых операций, мы смогли разработать метод для её подсчёта, опираясь на имеющиеся данные.

Базой для создания модели послужила Транспортная задача Монжа-Канторовича и метод аппроксимации Фогеля. Однако эти методики разработаны для подсчёта и итерационного улучшения плана перевозок на будущее, тогда как нам приходится иметь дело с экономикой прошлого, располагая при этом ограниченными данными.

Фрахт – это плата перевозчику за доставку груза до места назначения. Стандартный метод подсчёта стоимости и затрат транспортных перевозок базируется на знании расстояния перевозки, количестве и габаритах груза, стоимости услуг транспортной компании и фрахта. Зная эти показатели, можно подсчитать затраты, связанные с перевозкой товаров и вычесть их из показателя прибыли. Однако нам известны лишь расстояние перевозки (Ньюкасл-апон-Тайн–Гольчиха) и количество груза (вес). Остальные показатели подсчитываются основываясь на статистических данных по ценам на товары и услуги в данный период, учитывая фактор риска. Фрахт F может быть рассчитан исходя из следующих показателей: количество перевозимого груза, расстояние перевозки, ценность груза (оценка владельца и страховка), скорость перевозки, фактор риска и время на доставку:

$$F = \sum (q \times v)\, d\, (p / 1);\ t = (d : s) \Rightarrow t \times (p / 1 - r);$$
$$v = p / 1 : x,$$

где q – количество груза; d – расстояние перевозки; t – время; s – скорость; $p/1$ – цена за одну единицу пути; x – требуемые затраты.

Таким образом:

$$F = \sum (v + pd) \text{ если } (-t/v \text{ (за день)} \pm r) > 0,$$

где v – ценность груза; p – стоимость перевозки.

Каждый из указанных показателей зависит от ряда параметров, при помощи которых можно его рассчитать.

Так, фактор риска в ситуации морской торговли по СМП в XIX в. будет зависеть от количества успешных плаваний, времени навигации, условий плавания (природные: море, погода и пр. и технические: оснащение судна, тип судна, оборудование и пр.). Количество груза определяется весом и (или) габаритами груза. В нашей ситуации речь идёт о весе в пудах или английских фунтах. Габариты не учитываются. Так, например, в 1898 г. компания «Лейборн Попхэм» доставила в Гольчиху 155 827 пудов 25 фунтов (2493,2 т) кирпичного чая, 1957 пудов 16 фунтов стальных изделий и машин (31,3 т) и пр. [2]. Можно учесть габариты для таких изделий как машины, определив разницу в стоимости их перевозки. Однако на цену доставки груза это существенно не влияет.

Расстояние, на которое перевозились грузы, также известно. Существовало два основных маршрута: из Ньюкасла в устье Оби (залив Находка) и из Ньюкасла в устье Енисея (устье р. Гольчиха). Несколько раз морские суда поднимались по Енисею до Енисейска, где и производили выгрузку товаров. Именно так в 1910 г. и поступил капитан Вебстер на судне «Нимрод». Однако этот маршрут был менее популярен из-за того, что на речную навигацию тратилось много времени, что могло заставить суда зимовать на Енисее. Обский фарватер и бар не позволял проходить морским судам. Таким образом, расстояние перевозки определяется наикратчайшей дистанцией между тремя пунктами: Ньюкасл – Карские проливы (Маточкин или Югорский Шар) – устья рек Обь или/и Енисей. Это приблизительно 4570 км или 2467,6 морских миль (nmi).

Время перехода t является менее постоянной величиной. Обычно она зависит от расстояния и скорости. Так $t = d / s$, где d – расстояние; s – средняя скорость движения судна. Если расстояние уже установлено и является относительно постоянной (для данного маршрута) величиной, то средняя скорость зависит от скорости движения судна в узлах (kn)/сутки и времени, необходимого ему для прохождения ледовых препятствий. Последнее зависит от времени года, ветров, течений и прочих факторов, влияющих на ледовую обстановку. Практически, это время варьировалось от нескольких часов до нескольких недель. Таким образом, для точного определения продолжительности каждой отдельной экспедиции необходимо изучать её отчёты. Однако для общей картины достаточно определить среднюю продолжительность всех торговых экспедиций с 1886 по 1899 гг., которая составляла примерно 90 суток [3]. Это время, необходимое для доставки товаров, разгрузки судов, погрузки экспортных грузов и обратного пути.

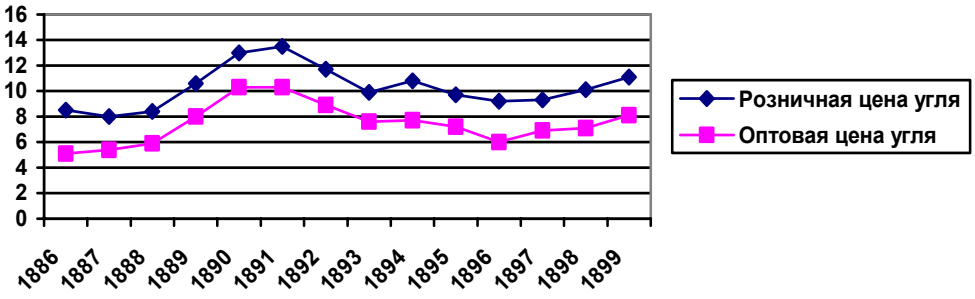
Следующим пунктом для определения является ценность груза v. Это показатель того, насколько владелец груза оценивает его стоимость на период перевозки. В случае его утраты он может рассчитывать на получение компенсации. Соответственно, чем ниже ценность груза, тем дешевле его перевозка и наоборот. Во многом ценность груза пропорциональна величине страховки. Она зависит не от отдельных страховых компаний, а от перевозчика и владельца груза. Так, она может быть равной страховке, а может вообще быть равной нулю. На ценность груза также будут влиять первоначальная его стоимость $v1$ и конечная ожидаемая стоимость $v2$. Этот фактор необходимо учитывать при отсутствии страховки товаров, перевозимых по СМП. Ценность груза также может определять заказчик. К примеру, золотодобывающие машины в Великобритании и Австралии в 8–9 раз дешевле, чем они могли бы стоить в Сибири [4]. Поэтому и заказчик, и владелец груза завышали ценность груза. Страховая премия за время существования Северного морского пути успела существенно снизиться. Если в 1887 г. она составляла от 12 до 21 %, то в 1896 г. стала равной 8 %. В 1897 г. она снизалась до 5½ % [3].

Стоимость перевозки vd состоит из цены перехода p, цены топлива c и факторов риска r. Так, $vd = (c + p + r)$. Цена перехода – это плата, запрашиваемая судовладельцем за перевозку груза. Она продиктована мировыми ценами на грузоперевозки в указанный период, но в отношении навигации в полярных морях она во многом субъективна, и зависит от желания судовладельца. В нашем исследовании мы рассматриваем компании, которые сами перевозили свои товары, посему цены перехода для каждой из экспедиций установлены заранее.

Цены на топливо зависят от объема его добычи и спроса на него на мировом рынке. В конце XIX в. основным топливом британской индустрии был каменный уголь. Большую часть своего угля англичане добывали в Уэллсе и в графствах Кент и Корнуолл. Увеличение объёмов мировой торговли, появление более мощных паровых судов и производство большего количество товаров привели к подорожанию угля на рынке. На рисунке показана динамика роста потребления угля с 1870 по 1900 гг.

Цены на топливо на протяжении последней четверти XIX в. росли волнообразно, достигая своего пика между 1890 и 1891 гг., когда они составили почти 14 шиллингов за английскую тонну, что видно из рисунка. К 1899 г. цены на уголь выросли в среднем на 4 шиллинга.

Естественным стремлением исследователей будет попытка учесть таможенный сбор, который получала российская казна от ввозимых и вывозимых товаров. Однако именно этот показатель совершенно отсутствует при расчете прибыли английских компаний.



Динамика изменения цен на уголь 1886 – 1899 гг.
(см. URL: www.therhondda.co.uk – history of coal prices in the United Kingdom from coal mined in Wales
(цена указана в шиллингах и пенсах за английскую тонну))

С 1869 г. в устьях Оби и Енисея действовал беспошлинный ввоз товаров – порто-франко. Такой шаг был предпринят ещё до первого успешного плаванья Д. Виггинса в 1874 г. для поощрения развития торговли по Северному морскому пути. Во многом именно он привлёк внимание английских предпринимателей к возможности морской торговли с Сибирью. Беспошлинный ввоз в устья Оби и Енисея действовал вплоть до 1899 г., когда был отменён по соображениям протекционистской политики царского правительства.

Буржуазия из Европейской России лоббировала в Министерстве финансов запрет на беспошлинный ввоз следующих товаров: иностранного сахара, готового платья, сукна, драпа, полотна, каустической и кальцинированной соды, стекла и стеклянных изделий, периодической печати, книг, спирта и спиртных напитков, табака и табачных изделий, листового чая, литографических камней. Таким образом, при подсчёте прибыли от продажи этих товаров нам придётся учитывать таможенный сбор, установленный на них.

«Высочайшим утверждением» беспошлинный ввоз на остальные товары продлевался 15 июля 1879 г., 18 апреля 1880 г., 2 марта 1881 г., 2 июня 1882 г. и 1 сентября 1883 г. Позже беспошлинный ввоз был продлён до 1885 г., а все права на ограничения передавались министру финансов [5].

Последние два показателя, для расчёта прибыли – это, естественно, первоначальная и конечная стоимость проданного товара $v1$ и $v2$. Среднюю стоимость тех или иных товаров на определённом рынке можно взять из сборников по экономической статистики за указанный период. Такими сборниками являются: Сибирский торгово-промышленный ежегодник, Торгово-промышленная газета, Statistical abstracts for the United Kingdom, Chamber of Commerce Journal, The Board of Trade Journal и пр.

Чаще всего ввозились следующие товары: чай кирпичный (плиточный), стальные рельсы, машины и запасные части к ним, гарпиус, цемент, соль, стеариновые свечи, рис, стальные и чугунные листы, бытовые инструменты, консервы, жесть, специи (гвоздика, корица, перец, имбирь, бадьян), каустическая сода, солёная рыба (шотландская и норвежская треска), сушёные фрукты, керосин, краска, машинное масло. Всего с 1886 по 1898 гг. было завезено примерно 650 тыс. пудов (10,4 тыс. т) различных товаров [2].

Подсчёт прибыли. Определив все факторы, необходимые для подсчёта прибыли, можно подсчитать прибыль, полученную от торговли одной из английских компаний. В качестве примера вычислим прибыль от продажи керосина, полученную компанией «Лейборн Попхэм», функционировавшей с 1893 по 1899 гг.

С 1893 по 1896 гг. она не ввозила керосин. В 1897 г. было привезено 5622 пуда керосина. Последующие два года также не привозилось керосина. Для начала подсчитаем первоначальную и конечную стоимость товара:

$$v1 = 3 – 4 \text{ коп. за фунт}; \; v2 = 8 – 10 \text{ коп. за фунт}.$$

Затем определим размер фрахта за груз и судно на 1897 г. Количество груза (5622 пуда; 179904 фунта) умножаем на его стоимость, которую можно установить как среднюю между конечной и изначальной стоимостью товара, т. е. 6 коп. Получаем примерно 11 тыс. руб. В настоящей задаче мы не будем учитывать цену на единицу пути, поскольку компания «Лейборн Попхэм» установила известную стоимость доставки товара на весь маршрут. Так, стоимость провоза любого товара в 1897 г. до Гольчихи была равна 70 коп. за пуд (за фунт = 2,1 коп.), до Енисейска – 1,10 руб. за пуд [3]. Расстояние перевозки равно приблизительно 2467,6 nmi. Продолжительность торговой экспедиции составила 52 сут. Суда находились в Гольчихе 20 сут. Соответственно, для доставки груза в одну сторону необходимо было 16 сут. Это даёт среднюю скорость в 6,3 kn. Таким образом, стоимость фрахта судна составила бы 300–550 фунтов стерлингов, принимая среднее водоизмещение судов, ходивших по Северному морскому пути, равным 800 регистровым тоннам.

Поскольку о компенсациях за не вовремя доставленный груз речи не могло и быть (слишком сложный маршрут) – то этот показатель мы не учитываем. Страховая ставка для паровых судов составляла в 1890-х годах приблизительно 15,5 %. Страховые премии на грузы в 1897 г. в Англии были равны 4,5–6 %. В России они составляли 3 %.

Взяв средние показатели по ценам и страховым премиям, мы можем подсчитать объем прибыли. От проданных 5622 пудов керосина компания получила бы примерно 6076 руб. прибыли. Учитывая, что керосин – самый дешёвый из привозимых товаров, была подсчитана прибыль от импорта, а также от экспорта других товаров. Она составила приблизительно 100–150 тыс. руб. на судно в 800 регистровых тонн. Поскольку количество успешных рейсов с каждым годом увеличивалось, падала и стоимость фрахта, и страховая премия. Такая прибыль не могла не привлечь предприимчивых англичан в Сибирь. Однако закрытие в 1898 г. порто-франко и установление общеевропейской пошлины на ввозимые товары сделало торговлю по СМП скорее убыточной, чем выгодной. Так, предприняв в 1899 г. последний рейс в устье Енисея, компания «Лейборн Попхэм» получила общую прибыль в 80 тыс. руб.

В результате проведённых исследований была выполнена задача исследования – установление объёма прибыли английских компаний от торговли по Северному морскому пути в конце XIX в. Также была разработана методика подсчёта фрахт и прибили от торговли, опираясь на исторические источники. Данную методику можно применить и к другим экономическим задачам в истории, изменив некоторые показатели (географический фактор, страховые премии, расстояние и пр.).

Библиографический список

1. История открытия и освоения Северного морского пути. Л., 1962. Т. 2: Пинхенсон Д. М. Проблема Северного морского пути в эпоху капитализма.

2. Руднев Д., Кулик Н. Материалы к изучению Северного морского пути из Европы в Обь и Енисей. Петроград, 1915.

3. Kinloch A. History of the Kara Sea trade route to Siberia. London : Printed by the Army and Navy Cooperative Society, Ltd., 1898.

4. Герасимов П. В. Окно в Азию. К вопросу о Северном морском пути // Золото и платина. 1913. № 17.

5. Гончаров А. Е. Северный морской путь и сибирское порто-франко // География и геоэкология Сибири. Красноярск, 2008. Вып. III. С. 230–233.

A. E. Goncharov

A METHOD OF CALCULATING PROFITS FROM BRITISH-SIBERIAN COMMERCE VIA THE NORTHERN SEA ROUTE 1886–1899

In this article we have studied issues of British-Siberian commerce via the Northern Sea Route (NSR) in the late 1800s. We have developed a technique of calculating profits from trade according to historical sources.

Keywords: Northern Sea Route (NSR), the Phoenix Adventures Enterprise, Francis Leyborne Popham Syndicate, freight, commerce, Transportation theory.

© Гончаров А. Е., 2011

УДК 65.01; 65.011.08

Л. В. Ерыгина, Е. А. Кустова, Ю. В. Жуковская

ВОЗМОЖНОСТИ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК ВУЗА

Исследование направлено на оценку перспектив коммерциализации научных разработок. В качестве теоретической основы использована концепция отраслевой технологической траектории, объясняющая наличие связи между отраслевыми особенностями и инновационным поведением. Предложена систематизация существующих инновационных разработок, проведен анализ их основных характеристик. Полученные возможности предложения инноваций сопоставлены с готовностью восприятия этих разработок промышленными предприятиями региона.

Ключевые слова: траектория инновации, вуз, коммерциализация в вузах, инновации, инновация в экономике, инновационные процессы.

Переход на инновационное развитие страны требует создания национальной инновационной системы, направленной на повышение восприимчивости экономики и всего общества к инновациям. Отраслевая структура экономики является одним из базовых параметров такой системы. Для различных отраслей экономики типичны различные модели возникновения и распространения инноваций, а также различный характер взаимосвязи между инновационной активностью компаний и результатами их производственно-хозяйственной деятельности, конкурентоспособностью на внутреннем и внешнем рынках.

Для создания эффективной национальной инновационной системы нужно учитывать сложность и многообразие форм взаимодействия многочисленных участников инновационной деятельности, форми-

рующих механизмы спроса и предложения на рынке инноваций, а также отраслевые траектории создания и распространения нововведений.

В настоящее время необходимо использовать перспективы практического использования накопленного научного потенциала в форме прикладных разработок отечественной экономики. Предлагаемые научной сферой инновационные разработки в весьма ограниченной степени воспринимаются производственным сектором.

Возможности преодоления разрыва между предложением и спросом на исследовательские разработки зависят от множества факторов, в числе которых важное значение имеют макро- и микроэкономические параметры, институциональные характеристики и культурные традиции.

Основные макроэкономические параметры: потребительские расходы, сбережения домохозяйств, инвестиции, государственные закупки товаров и услуг, чистые налоги, чистый экспорт, совокупный выпуск. Институциональная среда – один из важнейших компонентов институциональной матрицы, которая обрамляет процесс размещения ограниченных ресурсов, а также выявление новых возможностей использования существующих ресурсов и создание новых ресурсов.

Важно также обратить внимание на сложность и нестабильность институциональной среды для принятия экономических решений, особенно долгосрочных и связанных с использованием специфических активов, которые сопряжены, соответственно, с наличием формальных правил, допускающих различную трактовку и непрерывный процесс корректировки уже принятых законов.

В целях анализа использованы особенности отраслевой организации производства и возможности преодоления разрыва между предложением и спросом на исследовательские разработки как фактора, влияющего на структуру спроса и предложения на рынке инноваций.

Отраслевые траектории связывают основные отраслевые характеристики с особенностями инновационного поведения основных агентов экономики [1]. Ссылаясь на систематику К. Павитта [2], который на основании изучения более чем двух тысяч радикальных инноваций предложил пять основных технологических траекторий, каждая из которых характеризуется различной природой и источником инноваций и соответственно различной технологической стратегией и менеджментом.

В условиях российской экономической системы выделяют пять траекторий технологического развития: отрасли с доминированием поставщика; отрасли со значимым эффектом масштаба; отрасли наукоемких продуктов; отрасли, основанные на информации; отрасли, обеспечивающие специализированные поставки.

Для анализа особенностей предложения на основе описания инновационных разработок Института Сибирского отделения РАН был сформирован электронный массив данных, структура которого соответствует целям и задачам работы. В качестве исходных данных были использованы 420 разработок, представленных на постоянно действующей выставке разработок СО РАН. В соответствии с предложениями авторов разработок они распределены по 11 различным областям применения: химические технологии, новые материалы, информационные технологии, приборостроение, лесопромышленный комплекс, горное дело и строительство, металлургия, топливно-энергетический комплекс, машиностроение, медицина и здравоохранение, экология.

Разнообразие и разнородность разработок потребовали унификации их описания на основе выделения наиболее существенных для целей исследования признаков.

В результате каждая разработка была описана следующими параметрами:

1) возможная область применения (из 11 ранее перечисленных);

2) местоположение источника разработки (Новосибирский научный центр либо другие научные центры СО РАН);

3) тип инновации (продуктовая, процессная, сочетание продуктовой и процессной);

4) уровень новизны (отсутствует; новый для российского рынка, соответствует мировым аналогам, не имеет мировых аналогов);

5) уровень патентной защиты (отсутствует, имеются патенты РФ, имеются иностранные и международные патенты);

6) обоснованность стоимостной оценки инновационной разработки (отсутствие, есть граничные значения цены, обоснование цены);

7) степень готовности разработки (проектная документация, опытный образец, мелкосерийное производство, массовое производство);

8) оценка потенциальной емкости рынка (нет данных о рынке, узкий рынок, отрасль или группа связанных отраслей, широкий);

9) стратегия коммерциализации (отсутствие предложений; продажа лицензии, патента или других прав; поиск финансового или стратегического партнера для коммерциализации разработки; поставка продукта/оказание услуг; сочетание нескольких предложений).

На основе анализа полученной информации можно выделить ряд особенностей инновационных разработок.

По общему количеству предложений доминируют разработки, выполненные в Новосибирском научном центре (ННЦ), что вполне соответствует накопленному мощному исследовательскому потенциалу (числу исследовательских организаций, численности занятых и объему ресурсов). Существенных различий в значениях признаков между разработками ННЦ и разработками других организаций не наблюдается, за исключением признаков новизны и степени готовности, по которым у разработок ННЦ в целом более высокий уровень.

Основная часть (63 % от общего числа) инновационных разработок представляет собой новый продукт, процессные инновации составляют около пятой части всех предлагаемых разработок.

В то же время авторы инноваций не очень высоко оценивают уровень новизны собственных разработок: у большей части разработок новизна вообще не определена (46 %), или отмечено, что они находятся на уровне российских аналогов (40 %). Однако предлагаются и разработки мирового уровня (4 %) или вообще не имеющие мировых аналогов (9 %).

Почти половина разработок не обладает патентной защитой (46 %), а интеллектуальная собственность на подавляющее число остальных разработок защищена только российскими патентами (48 %), иностранными патентами защищено только 6 % разработок, преимущественно из ННЦ.

В результате изучения инновации можно выделить ряд факторов, влияющих на инновационные разработки: рынок (изучение конъюнктуры товарных рынков включает в себя обработку, анализ и систематизацию количественных показателей и качественной информации, характеризующей развитие рынка в данный период времени). Выбор системы показателей определяется целями конкретного исследования, например анализ развития рынка, анализ ситуации на рынке за определённый период времени, изменение технико-экономических характеристик производства. Все конъюнктурообразующие факторы, стимулирующие развитие рынка или сдерживающие его, классифицируются на постоянные, временные, циклические, нециклические.

К постоянно действующим факторам относится государственное регулирование экономики, научно-технический процесс, инфляция, сезонность в производстве и потреблении товаров. Факторы, воздействующие на конъюнктуру, периодически называются временными. Это, например, стихийные бедствия, социальные конфликты, чрезвычайная обстановка. В развитии рынков может появляться определенная повторяемость, цикличность, вызванная сезонным изменением спроса и предложения, жизненными циклами товаров (выведение товаров на рынок, рост, зрелость, упадок), сдвигами в воспроизводственной структуре, колебаниями инвестиционной активности, сменой экономической политики. Факторы нециклического характера определяют специфику производства и реализацию конкретных товаров. Воздействие различных факторов на процесс производства и обращения любого товара позволяет выявить связи между происходящими событиями и вызвавшими их причинами. Именно воздействие различных факторов на процесс производства и обращения товара отражается в движении коньюктуры рынков: новые продукты, сегментация рынка, технология, доминирующие стратегии, готовность разработки, степень защиты инновации, спрос.

Доминирующая степень готовности предлагаемых новых продуктов представляет собой стадию опытных образцов (62 %), серийные изделия и предложение массового производства составляют 18 и 10 %.

Преимущественно новые продукты ориентированы на использование в узких сегментах рынка (62 %), или могут иметь точечное применение (23 %).

Стоимость продажи определена только для трети разработок (36 %). Значительная часть разработок не имеет обоснованной цены (56 %).

Следует отметить, что рыночные перспективы предлагаемых инновационных разработок в значительной степени связаны со степенью готовности и уровнем защиты – по мере увеличения потенциального рынка применения инновации происходит рост уровня готовности и степени защиты инновации.

Способ и характер продвижения разработок на рынок зависит от того, к какому типу относится та или иная научная разработка (технология, прибор, продукт, материал и др.), на какого потребителя она ориентирована.

Соответственно, доминирующей стратегией выступает поиск партнера для создания производства и коммерциализации инновационной продукции (37 %), при этом поиск партнера часто сопровождается готовностью самостоятельного индивидуального или мелкосерийного производства, продажей лицензий и др. (25 %). Прямые продажи готовых продуктов/услуг предлагает меньше трети разработчиков (28 %). В то же время продажа лицензий как единственное направление коммерциализации встречается реже всего (5 %), что может быть связано как с проблемами в определении справедливой цены, так и с низкой готовностью потребителей к приобретению лицензий отечественных разработчиков.

Были выявлены некоторые зависимости предлагаемой разработчиками стратегии коммерциализации: более высокая степень готовности разработки сопровождается более сложной и развитой стратегией ее продвижения. Уровень патентной защиты выше у разработок, характеризующихся высокой степенью готовности. Существует положительная связь между широтой рынка сбыта и степенью готовности.

Результаты анализа подтвердили наличие общих ожидаемых особенностей разработок, предлагаемых научным сообществом: в структуре предложения инновационных разработок доминируют продуктовые инновации, находящиеся в стадии опытного образца и ориентированные на узкий рынок, преимущественно российский. Вполне закономерно, что предлагаемые разработчиками стратегии коммерциализации в целом соответствуют рассмотренным признакам – для коммерциализации опытного образца со средним уровнем новизны и узким рынком сбыта требуются значительные и специализированные ресурсы, которые предполагается привлечь с помощью партнера.

Необходимо отметить, что в структуре предложения инновационных разработок происходят значимые сдвиги. Для иллюстрации этих сдвигов рассмотрим динамику изменения числа и структуры предложения. Около 9 лет назад исследователями были сделаны выводы и видно, что тенденция динамики предложения инновационных разработок сохраняется. Сводные данные по разработкам в динамике представлены на рис. 1.

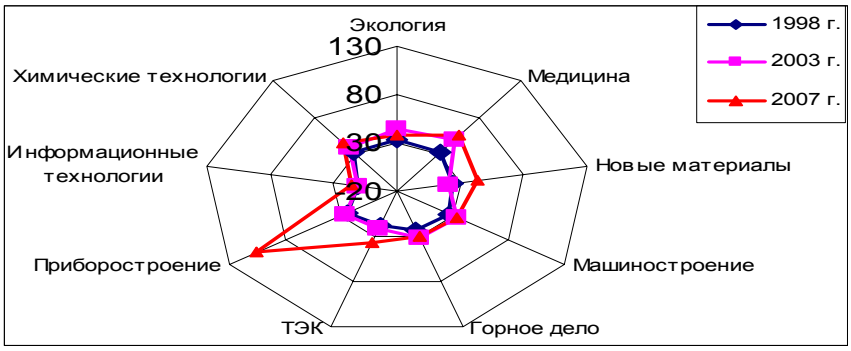


Рис. 1. Динамика предложения инновационных разработок

Сравнительный анализ показал, что за последние годы произошли определенные сдвиги в области предложения инновационных разработок. Отметим общий рост числа предложений: в 1998 г. было представлено 242 разработки, в 2003 г. – 319 разработок и в 2007 г. – 420 разработок. За последние 5 лет количество разработок выросло на 50 %, при этом опережающими темпами росло предложение в области приборостроения (почти 300 %) и новых материалов (более 100 %), что связано с увеличением прикладной направленности получаемых результатов научных изысканий и углублением специализации академических исследований. Наибольший рост предложения разработок произошел в области информатики и приборостроения, а также в области химии и новых материалов. В 2007 г. в области информационных технологий было представлено 15 разработок, направленных на компьютерное моделирование различных процессов, и 106 разработок, относящихся к созданию различных приборов и установок. В области химических технологий было предложено 46 разработок, направленных на создание химических технологий, и 44 разработки, связанных с созданием новых материалов.

Наибольшая часть разработок предназначена для использования в отраслях, связанных с приборостроением, новыми материалами и медициной. Значительную долю имеют разработки, направленные на предложение новых химических технологий.

Услуги по информатизации технологических и бизнес-процессов составляют относительно небольшую величину, что связано прежде всего с особенностями использованного канала продвижения инновационных разработок. Большинство услуг по информатизации реализуется с использованием других форм продвижения, в основном прямых контрактов с потребителями.

На следующем этапе исследования все ранее систематизированные 420 разработок были отражены через призму выделенных отраслевых траекторий технологического развития, описанных выше. Результаты представлены на рис. 2.

На основе полученных данных можно констатировать в 2007 г. доминирование в структуре предложения двух отраслевых траекторий: пятой – предложения, предназначенные для отраслей, обеспечивающих специализированные поставки (156 разработок из 420) и третьей – для отраслей наукоемких продуктов (137 из 420).

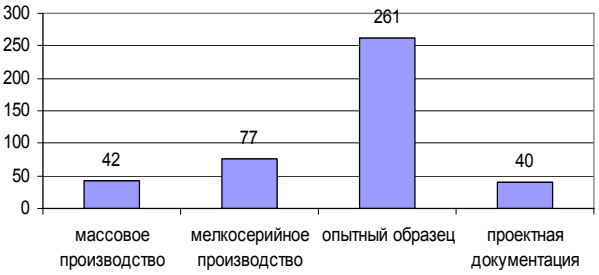


Рис. 2. Готовность разработок

В целом, в динамике происходят сдвиги в структуре предложения инновационных разработок (рис. 3), которые можно оценить позитивно.

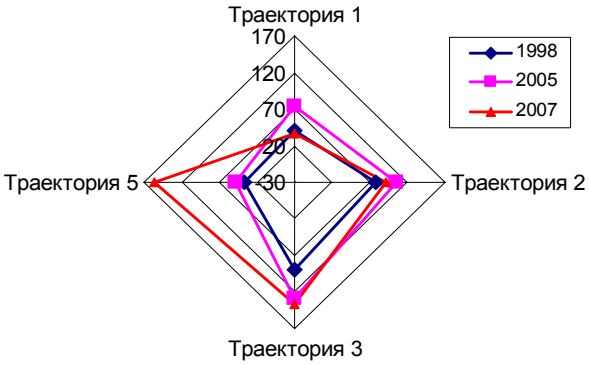


Рис. 3. Динамика предложения инновационных разработок в разрезе отраслевых траекторий

За рассматриваемый период усилилась дифференциация деятельности в рамках научных институтов за счет формирования групп, производящих коммерциализируемые продукты, которые выступают в роли «специализированных поставщиков» продуктов и услуг для различных отраслей экономики. Большая часть разработок в целом предназначена для отраслей, которые менее восприимчивы к инновациям, чем отрасли, источники инноваций которых опираются на R&D (Высшей школой экономики совместно с Рос-

статом и Минобрнауки подготовлен сборник «Индикаторы науки: 2009». Сборник дает весьма детальную картину состояния российских научных исследований и разработок (Research&Development) в последние годы).

Значительно увеличилось предложение разработок именно по тем отраслевым траекториям, которые соответствуют специфике разработок, выполненных научным сообществом, т. е. № 5 и 3.

В то же время позитивные структурные сдвиги со стороны предложения можно считать необходимым, но явно недостаточным условием для адекватного роста инновационной активности реального сектора экономики.

Оценка спроса на инновационные разработки со стороны предпринимательского (реального) сектора экономики является сложной задачей, недостаточно проработанной методически и слабо обеспеченной статистической базой. Для исследования использованы доступные данные государственной статистики и анкетного опроса группы предприятий НСО. В качестве индикаторов спроса использовались доля инновационно-активных предприятий в общем числе организаций, доля инновационной продукции в общем объеме выпуска, доля затрат на исследования и разработки по отношению к объему выпуска продукции (наукоемкость).

Наибольшее число инновационно-активных предприятий сосредоточено в производстве кокса и нефтепродуктов, производстве электрооборудования, электронного и оптического оборудования, производстве транспортных средств и оборудования, а также в химическом производстве.

Если дополнить данные официальной статистики результатами инициативных обследований, то общая картина становится более удручающей.

Особенностью исследования является изучение спроса на инновации вообще и изучение спроса именно на разработки исследовательского сектора. Акцент в исследовании спроса на инновации сделан на источник инноваций в виде R&D, выполняемых в академических институтах. Следует отметить, что наукоемкость отечественных производств находится на очень низком уровне. Максимальная величина этого показателя в производствах электрооборудования, электронного и оптического оборудования, далее следуют производство транспортных средств и оборудования и производство машин и оборудования. Показатели наукоемкости дают основания оценивать потенциальный спрос на исследовательские разработки академического сектора как крайне низкий. Основными характерными чертами наукоемких производств являются общедоступная и эффективная система подготовки высококвалифицированных кадров; эффективная система защиты прав на интеллектуальную собственность; оперативное внедрение разработок, обеспечивающих повышенную конкурентоспособность, высокая динамичность производства; государственное стимулирование и поддержка (законодательная, финансовая и налоговая); активная и эффективная инвестиционная и инновационная деятельности; использование в производстве передовых технологий; длительный жизненный цикл многих видов продукции, достигающий, например, в гражданской авиации, по данным The Airline Monitor за прошлые годы, 30–40 лет: 5–7 лет – разработка, 1–2 года – производство, 27 лет – средний срок эксплуатации; высокие удельные затраты на НИОКР и ряд других факторов. Технологическое отставание подавляющего большинства предприятий существенно, что отражается на конкурентоспособности выпускаемой продукции. Данные анкетного опроса предприятий НСО показывают, что преодолеть технологическое отставание большинство предприятий считают возможным в благоприятных условиях за период от 1 до 10 лет, а в неблагоприятных – от 5 до «никогда». Наиболее пессимистичные оценки ситуации дают предприятия машиностроения и приборостроения – отраслей, определяющих технический и технологический уровень экономики в целом. Основным направлением преодоления технической отсталости и обеспечения роста конкурентоспособности предприятия считают приобретение технологического оборудования, причем зарубежного. Хотя около трети предприятий имели контакты с исследовательскими институтами СО РАН, подавляющее большинство предприятий не связывают перспективы своего будущего инновационного развития с разработками этих организаций.

Таким образом, специфика отраслевой организации промышленности региона отражается на низком уровне потенциального спроса на разработки, выполняемые академическим сектором.

Потенциал коммерциализации инновационных разработок, создаваемых академическим сектором, не реализуется в полной мере из-за воздействия комплекса факторов, относящихся к качеству предложения, структуре спроса и механизмам взаимодействия между ними [3]. Именно они являются барьерами на пути коммерциализации научных разработок, обуславливают существование значимых разрывов. Факторы можно объединить в три большие группы:

1) особенности предлагаемых академическим сообществом разработок;

2) состояние отечественной экономики в целом, в том числе характеристики отраслевой структуры реального сектора как потребителя и заказчика результатов R&D;

3) параметры инфраструктуры инновационного рынка.

Как было показано выше, предлагаемые для внедрения результаты научных исследований преимущественно характеризуются недостаточным уровнем технологической зрелости разработок, отсутствием комплексности предоставляемых продуктов и услуг, а также отставанием по уровню новизны от зарубежных аналогов, что в совокупности формирует недостаточную конкурентоспособность отечественных разработок. В то же время часть разработок демонстрирует соответствие мировому уровню, а некоторые даже его превосходят.

Востребованность разработок со стороны предприятий ограничивается рядом барьеров, которые

отслеживаются в рамках программ по мониторингу инновационного поведения предприятий.

Результаты исследования позволили выявить отраслевые особенности восприятия предприятиями разработок исследовательского сектора, которые выражаются в существовании технологических траекторий инновационного развития. Аналитические результаты показывают, что вероятность использования научных разработок в качестве источника создания и распространения инновационных продуктов/технологий выше в двух укрупненных секторах, соответствующих отраслям наукоемких продуктов (3 траектория) и отраслям, относящимся к категории специализированных поставщиков (5 траектория). Основные барьеры продвижения разработок, ориентированных на 5 траекторию, связаны, прежде всего, с жестко лимитированными финансовыми ресурсами потребителей. Другое препятствие – отсутствие у поставщиков возможностей комплексной поставки целостных систем и технологий. В то же время специфика инноваций, пользователи которых относятся к данной траектории, обуславливает необходимость такой комплексности. Для третьей траектории также актуальны финансовые ограничения, фактическое состояние российских отраслей этого сектора делает данный барьер еще более значимым. К сожалению, именно данный блок отраслей в наибольшей степени пострадал и деградировал в постсоветский период. Начало восстановления отечественных наукоемких, высокотехнологичных отраслей, безусловно, создаст серьезные стимулы для увеличения спроса на разработки исследовательского сектора. В то же время этот спрос должен быть обеспечен необходимыми ресурсами: финансовыми, что совершенно очевидно из результатов опросов предприятий, информационными и кадровыми, что в настоящее время менее осознается производственными предприятиями. Институциональные факторы существенно тормозят продвижение разработок, адресованных отраслям второй траектории.

По мнению руководителей российских предприятий, препятствием росту спроса на отечественные научные разработки являются не собственно проблемы сектора исследований и разработок, а проблемы, связанные с неразвитостью инновационной инфраструктуры, прежде всего, ее информационной компоненты, и несовершенства системы стимулирования инноваций.

Развитая инфраструктура обеспечивает беспрепятственное взаимодействие между различными элементами инновационного процесса, и именно этот блок формирующейся российской инновационной системы развит слабо.

В настоящее время усиленно создаются отдельные элементы инновационной инфраструктуры, которые должны стать мостом между исследовательским и предпринимательским секторами. Однако отдельные подсистемы развиты неравномерно, и такой несбалансированный характер развития инновационной инфраструктуры можно считать серьезным барьером на пути коммерциализации научных разработок. Необходимо развитие технологических площадок, наукоградов. В самой деятельности оно должно сопровождаться грамотной оценкой эффективности и в каждом отдельном случае будет формироваться свой механизм коммерциализации.

Преодолению барьеров может значительно способствовать встраивание разработчиков в технологические цепочки, в том числе в сложные сетевые взаимодействия с крупным и мелким бизнесом, в том числе иностранным, что позволит повысить как «уровень готовности» инновационных разработок, так и степень их восприимчивости со стороны конечного заказчика.

Исследовательский сектор нуждается в смене основной парадигмы – с «проталкивания» технологий на изучение спроса на них. Позитивное влияние окажет переориентация предпринимательской сферы на использование отечественных, а не импортных технологий, что будет способствовать росту инвестиций во внутренние или контрактные НИОКР.

Библиографические ссылки

1. Кравченко Н. А., Юсупова А. Т., Кузнецова С. А. Инновационные предложения в зеркале отраслевых траекторий // Инновации. 2006. № 4 (91).

2. Tidd J., Bessant J., Pavitt K. Managing Innovation. Second ed. // John Wiley & Sons Ltd, England. 2003.

3. Дежина И. Г., Салтыков Б. Г. Механизмы стимулирования коммерциализации исследований и разработок // Научные труды ИЭПП № 72Р. М. : Ин-т проблем переходного периода, 2004.

L. V. Erygina, E. A. Kustova, Yu. V. Zhukovskaya

POSSIBILITIES OF COMMERCIALIZATION OF INNOVATIONS DEVELOPING AT INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION

This investigation is addressed to appraisal of scientific preparation commercialization prospect. As the theoretical base the branch's technological trajectory conception is used. It explains the connection between branch's peculiarity and innovation behavior. The systematization of existent innovative developments is suggested, the analysis of their basic characteristics is conducted. The derived opportunities of innovative development are correlated with regional industrial enterprises readiness to accept these developments.

Keywords: trajectory of innovation, institute of higher education, commercialization in institutes of higher education, innovation in economics, innovative process.

© Ерыгина Л. В., Кустова Е. А., Жуковская Ю. В., 2011

УДК 339.9(100)

В. А. Иванников

МЕСТО И РОЛЬ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗВИТИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Обобщены существующие представления о роли инноваций в волновом развитии экономики, представлен анализ различных мнений, определены концептуальные подходы к их оценке с точки зрения современной экономической теории.

Ключевые слова: теория цикличности, экономический цикл, инновационные технологии, экономическая система.

Экономическая наука давно определила подвижность фаз воспроизводственных процессов, их взаимообусловленность, взаимозависимость, взаимное влияние и проникновение. Исходной для начала движения в русле экономической динамики может быть любая фаза. Согласно традиционному подходу, это – оживление (восстановление), подъем (процветание), спад (рецессия) и депрессия; при эволюционно-генетическом – зарождение, развертывание, функционирование и отмирание. Фазы развития, последовательно сменяя друг друга, взаимодействуют между собой как напрямую, так и опосредованно. В качестве «точки отсчета» может быть избрана любая из них, но, несмотря на обусловленное структурно-цивилизационными сдвигами изменение значимости той или иной фазы, определяющее значение в развитии всей экономической системы принадлежит инновационным технологиям. Экономическая система на определенном этапе подходит к границам своего роста в рамках старого качества. Задача преодоления ограничений экономического роста активизирует поиски новых внутренних источников развития в форме передовых технологий и технических средств. Сформировавшиеся точки роста притягивают ресурсы, изменяя структуру экономической системы. Для перехода к другой траектории необходимо изменение существующей структуры и формирование новой, что представляется возможным только на основе разработки и внедрения инновационных технологий и продуктов. В результате создается новая инфраструктура, появляются новые приоритеты экономической политики, происходит корректировка цели, мотивов и средств ее достижения, изменяется направленность развития экономики. Для российской экономики учет структурно-циклических особенностей ее динамики является основой разработки стратегии будущего развития. В связи с изложенным, особую актуальность приобретают проблемы теоретического и методологического обоснования взаимосвязи времени освоения и внедрения новой волны базисных технологических инноваций с циклической динамикой развития экономики. От правильного выбора стратегии, своевременности и направления процессов инновационного развития, качественного учета возможных последствий зависят обеспечение экономической безопасности России и ее дальнейшее процветание.

Цель данного исследования – проследить эволюцию взглядов и обобщить существующие представления о роли инноваций в волновом развитии экономики, произвести сравнительный анализ различных мнений, определить концептуальные подходы к их оценке с точки зрения современной экономической теории. Для получения такой информации необходимо всестороннее изучение теорий циклической динамики экономики и их связи с развитием технологических инноваций.

Проведенные исследования свидетельствуют, что эти вопросы привлекли внимание ряда экономических школ и многих экономистов, и за довольно длительный период изучения экономических циклов было предпринято множество подходов к исследованию данного взаимодействия. Периоды циклического развития экономики, восприимчивые к инновациям, впервые были открыты и исследованы великим русским экономистом начала прошлого века Н. Д. Кондратьевым и получили название длинных циклов экономической конъюнктуры. В числе предшественников Н. Д. Кондратьева при исследовании данных процессов обычно называют А. И. Гельфанда, М. И. Туган-Барановского, А. Афталиона, В. Парето, М. Ленуара, Ж. Лескюра. Однако именно Н. Д. Кондратьев выявил и всесторонне обосновал закономерную связь разработки и внедрения технических изобретений и технологических инноваций с волнами «повышательных» и «понижательных» стадий циклов развития экономики. Он писал: «…Перед началом повышательной волны каждого большого цикла, а иногда и в самом начале ее наблюдаются значительные изменения в основных условиях хозяйственной жизни общества, которые выражены в значительных изменениях в технике (чему предшествуют, в свою очередь, значительные технические открытия и изобретения)…» [1]. В своих исследованиях он пришел к выводу, что инновационные технологии воспринимаются экономикой только в определенные периоды ее развития и дают ощутимую добавленную стоимость через определенный промежуток времени. На основе исследования внутреннего механизма генезиса длинной волны установил органичную «встроенность» в него ритмики технического прогресса. Оценив статистические данные динамики товарных цен, заработной платы, ссудного процента, государственных долговых бумаг, оборота внешней торговли, наиболее важных натуральных показателей развития промышленного производства в мировом капиталистическом хозяйстве (Великобритании, Франции, США, Германии и дру-

гих) почти за 140 лет, Н. Д. Кондратьев обосновал существование в исследованном временном интервале длинноволновых колебаний – трех больших циклов (включая последний, незавершенный на тот момент) продолжительностью от 47 до 60 лет с периодическим чередованием восходящих и нисходящих фаз. Проведенные исследования позволили выявить временные периоды с долговременными подъемами в мировом хозяйстве: 1789–1814, 1849–1873 и 1896–1920 гг., и с долговременными спадами: 1814–1849, 1873–1896 гг. и следующей нисходящей фазы, наступившей после завершения Первой мировой войны. Материальной основой волнообразных движений Н. Д. Кондратьев считал чередование процессов нарушения и восстановления состояний экономического равновесия [1]. Отклонения от равновесного состояния между рыночным спросом и предложением, по его мнению, предопределяют краткосрочные циклы в основе больших циклов конъюнктуры, проявляющиеся в движении товарных запасов, периодичности нарушения равновесия между наличием «основных капитальных благ» и главными факторами, определяющими технический способ производств; при этом долговременные колебательно-волнообразные движения свойственны как научно-техническому прогрессу в целом, так и целой группе частных социально-экономических процессов – от накопления капитала до сдвигов в технологической структуре производства.

Гипотеза Н. Д. Кондратьева об ограниченности статистической теории общего равновесия на большом аналитическом материале была апробирована Йозефом Шумпетером (1883–1950 США) [2] и получила несколько иную теоретическую интерпретацию. Й. Шумпетер ведущее место в структурной динамике экономических систем отводил предпринимательской функции, рассматривая предпринимателя в качестве главного звена инновационного процесса, усматривая причины больших циклов в предприимчивости деловых людей, в их готовности к риску и инновациям. По мнению Й. Шумпетера, новаторы-предприниматели – те, кто способен реализовать новые идеи в эффективные экономические решения. В погоне за прибылью и эффективностью предприниматели осуществляют новые комбинации, включающие производство новых продуктов, применение новых методов производства, использование существующих благ, освоение новых рынков сбыта, источников сырья, изменение отраслевой структуры (создание или подрыв монополии), это выводит экономику из привычной траектории развития, ее равновесного состояния. По его мнению [2], неравномерное появление новых предпринимателей, открывающих дорогу развитию инноваций, вызывает резкий подъем в экономике, а затем спад, не все люди обладают предпринимательскими способностями, и процесс новаторства продолжается до тех пор, пока новая комбинация не станет рутиной, привычной и доступной функцией для всех экономических агентов. Продолжая заниматься обычным делом – рутиной, предприниматель утрачивает свою новаторскую функцию. Периодичность нарушения экономического равновесия и продолжительность циклических колебаний он связывал с процессами «кластеризации» нововведений: появление нововведений в одной отрасли стимулирует общее развитие экономики. Под нововведениями, наряду с внедрением технических изобретений, он понимал самые разные инновации – от форм организации производства до изменений моды. Й. Шумпетер, критикуя взгляды своих современников, утверждал: «… они не могут сделать правильных выводов о рыночной экономике, поскольку проблему видят в том, что капитализм функционирует в рамках существующих структур, тогда как действительная проблема состоит в том, что он создает и разрушает эти структуры… в капиталистической действительности преобладающее значение имеет конкуренция, в том числе, основанная на открытии нового товара, …, нового типа организации. Эта конкуренция обеспечивает решительное сокращение затрат или повышение качества, она угрожает не незначительным сокращением прибылей и выпуска, а полным банкротством. … И по своим последствиям относится к традиционной конкуренции как „бомбардировка к взламыванию дверей”». Й. Шумпетер одним из первых обратил внимание на высокую неопределенность, рискованность инновационной деятельности, а также на необходимость проводить исследования и патентовать изобретения. Й. Шумпетер, продолжив исследования Н. Д. Кондратьева, разработал инновационную теорию длинных волн, интегрировав ее в общую инновационную концепцию экономического развития, которая стала фундаментом современной эволюционной теории экономического роста. По его мнению, именно инновации вызывают к жизни длинные циклы деловой активности. Он писал, что, когда инновации внедряются в экономику, имеет место так называемый «вихрь созидательного разрушения», подрывающий равновесие прежней экономической системы, вызывающий уход с рынка устаревших технологий и отживших организационных структур, приводящий к появлению новых жизнеспособных отраслей, в результате чего происходит небывалый рост экономики и благосостояния граждан. Инновации выступают в роли локомотива экономического развития, определяя его эффективность, рост производительности труда и качества жизни. Согласно его концепции, движущая сила процветания – инновации в основной капитал, который служит, в свою очередь, воплощением инноваций. Экономический цикл развивается следующим образом: в результате активизации предпринимательской деятельности повышается спрос на средства производства, экономические ресурсы в этот период перетекают от старых предприятий к новым, на следующем этапе новые товары заполняют рынок, занимая свою нишу, и в последствии, бурное развитие предпринимательской деятельности приводит к кредитной инфляции.

Теория длинных волн акцентирует внимание на изучении лишь одного типа циклической динамики – долгосрочных квазипериодических колебаний социально-экономического и научно-технического развития. Наряду с Кондратьевскими циклами, экономистам хорошо известны конъюнктурные циклы мень-

шей продолжительности, названные именами ученых XIX–XX вв., впервые их зафиксировавшими или внесшими решающий вклад в их эмпирическое исследование. Среди них краткосрочные: 3–4-годичные циклы Джозефа Китчина («циклы запасов»), возникающие вследствие неизбежной при рыночном хозяйстве неравномерности инвестиций в запасы сырья, материалов и товарный капитал. Известны среднесрочные 7–11-летние торгово-промышленные циклы Клементина Жугляра и так называемые интерциклы Э. К. Лабруса, в полтора раза по своей продолжительности превышающие циклы К. Жугляра. В эту группу могут быть отнесены и четвертьвековые 20–25-летние «строительные циклы» Саймона Кузнеца, связанные с периодическим обновлением жилых помещений и некоторых типов производственных объектов. Р. Камероном были обоснованы, а впоследствии Г. Эмбером, Ф. Броделем и другими экономистами и историками исследованы еще более длительные волны экономической конъюнктуры, укладывающиеся в период 150–300 лет. Такие сверхдолгие циклы, динамика которых описывается Р. Камероном с помощью логистической кривой, известны под названием вековых трендов.

Особенность подхода К. Фримена к обоснованию места и роли инновационных технологий в развитии макроэкономических систем заключается в анализе конкретно-исторического содержания каждой длинной волны Кондратьевского цикла. К. Фримен рассматривал длинноволновый подъем не только как результат внедрения радикальных нововведений в одной или нескольких отраслях и их последующего роста, а как процесс диффузии технологической парадигмы от нескольких лидирующих секторов ко всей экономической системе. Он также подчеркивал то обстоятельство, что широкое распространение технологий становится возможным в результате ряда социальных и институциональных изменений, таких как кооперация и конкуренция в предпринимательском секторе, организация научно-исследовательской деятельности, уровень участия государства в стимулировании инновационной деятельности, национальные и международные режимы экономического регулирования. К. Фримен утверждал [3], что потенциал новой технологической парадигмы лучше всего реализуется через массовое участие граждан в создании и внедрении новых технологий. Децентрализация и передача полномочий контроля в этом случае являются мерами первостепенной важности. Создание организационных структур для приемлемого сочетания централизованной координации и стимулирования инвестиционной активности с максимальным вовлечением предпринимателей в создание и развитие новых технологий становится важнейшей социальной инновацией.

Процесс проникновения («диффузии») инновационных продуктов на рынки всесторонне исследован Э. Мэнсфилдом (США) и др. В результате им установлено [4], жизненный цикл инноваций достаточно точно описывается логистической функцией, график которой в системе координат представляет S-образную нелинейную кривую, что свидетельствует о нелинейной природе инновационного процесса. На первом этапе внедрения инноваций действуют силы положительной обратной связи, благодаря чему проникновение инноваций происходит с ускорением. Когда скорость освоения инноваций достигает определенного критического значения, автоматически включается отрицательная обратная связь, вызывающая замедление инновационного процесса и приводящая в конечном итоге к насыщению рынка, достижению предельной его емкости. Нелинейный характер инновационного процесса означает, что каждая траектория инновации, развиваясь, достигает уровня насыщения в пределах конечного отрезка времени, определяющего жизненный цикл нововведения. Проникновение инноваций в экономику происходит по логистической траектории только при благоприятных конъюнктурных условиях. Если же экономика попадает в зону турбулентности или приходит в состояние застоя, то разработанные инновационные продукты не доходят до стадии внедрения. Когда экономика вновь находится в состоянии подъема, то невостребованные инновации проходят 3 и 4 стадии своего жизненного цикла – внедрение и использование, – вновь укладываясь в рамки исходной траектории.

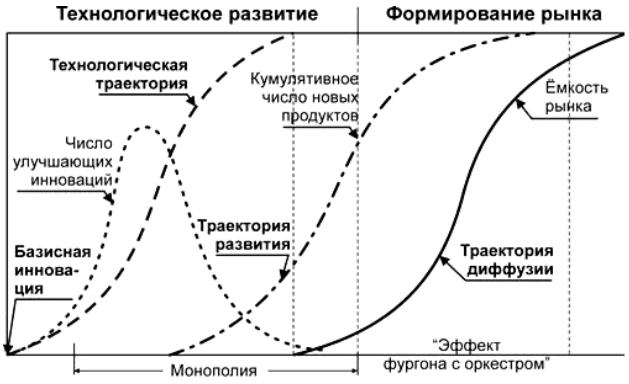
Японский исследователь Масааки Хироока установил [5], жизненный цикл инноваций постепенно сокращается, начиная с 90 лет со времен первой промышленной революции XVIII в. до 25 лет в настоящее время.

Ю. В. Яковец [6] выдвинул гипотезу о том, что циклы хронологически «сжимаются» по мере ускорения научно-технического прогресса.

По мнению многих исследователей, период от начала разработки и внедрения инноваций до момента насыщения рынка в настоящее время длится от 25 до 30 лет, это нижний предел и вряд ли в обозримом будущем удастся уменьшить его продолжительность.

В продолжение исследований Й. Шумпетера было выявлено, что не менее значимым свойством инновационного процесса является его самоорганизация, являющаяся следствием нелинейной природы инноваций. Благодаря самоорганизации инновации действуют не в одиночку, а, как правило, группами, собираясь в тесную связку и образуя так называемые «кластеры». Инновации внутри одного кластера взаимно усиливают друг друга, вызывая синергетический эффект. Именно благодаря синергетическому эффекту взаимодействия инноваций внутри кластера создаются условия для мощного кумулятивного роста экономики, обеспечивая прорывной характер ее развития. Кластеры базисных технологий приводят к возникновению новых отраслей и, тем самым, создают условия для развития длительных экономических циклов, формируя их повышательную стадию, достигающую своего пика в момент созревания инноваций. Совокупность кластеров базисных инноваций, по мнению С. Ю. Глазьева [7], образует технологический уклад.

М. Хироока [5] впервые установил, что любая инновационная парадигма состоит из трех логистических траекторий: технологической, развития и диффузии (см. рисунок).



Структурно-инновационные парадигмы
с тремя траекториями [2]

По его мнению, технологическая траектория представляет собой совокупность «ключевых» технологий, относящихся к рассматриваемой инновации. Траектория развития – совокупность новых инновационных продуктов, полученных на основе ключевых технологий. Эта траектория играет самую важную роль в инновационной парадигме, поскольку именно на данном этапе осуществляется передача инновационных технологических знаний, и, с целью освоения новых инновационных продуктов и дальнейшей их коммерциализации, возникают венчурные предприятия. Исследовав технологическую траекторию, М. Хироока показал, что она описывается логистической функцией и длится около 25–30 лет, начавшись с какого-либо значительного открытия. Из рисунка видно, что инновационная парадигма имеет каскадную структуру, состоящую из трех логистических траекторий, отстоящих друг от друга на определенный фиксированный промежуток времени, устанавливаемый эмпирическим путем. Это позволяет осуществлять достаточно точное прогнозирование времени наибольшего распространения и внедрения будущих нововведений, поскольку траектория диффузии инноваций выстраивается после траекторий разработки и развития соответствующих технологий.

В периоды депрессии экономика наиболее восприимчива к инновациям. Депрессия заставляет искать возможности для выживания, а инновационный процесс может их предоставить. Впервые этот факт установил немецкий исследователь Г. Менш [8] и назвал его «триггерным эффектом депрессии», имея в виду, что депрессия запускает инновационный процесс. Г. Менш также показал, что инновационный процесс является неравномерным и циклическим и каждый раз в процессе диффузии заканчивается образованием кластеров инноваций. По мнению К. Фридмена [9], это происходит во время оживления. По-видимому, время запуска инновационного процесса занимает значительный период, охватывающий фазу депрессии и частично начало фазы оживления. Но лишь вначале XXI в. на основе анализа большого массива эмпирических данных М. Хироока [5] доказал наличие тесной корреляционной связи между процессами «диффузии» инноваций и развитием больших циклов Н. Д. Кондратьева и подтвердил, что диффузия нововведений, благодаря механизму самоорганизации, выборочно собирает кластер инноваций вдоль подъема большого Кондратьевского цикла. Так, базисными инновациями четвертого Кондратьевского цикла стали эпохальные достижения научно-технической революции XX в.: атомная энергетика, квантовая электроника и лазерные технологии, электронные вычислительные машины и автоматизация производства, спутниковая связь и телевидение. Наряду с этим, в тот же период происходило бурное развитие автомобиле- и авиастроения. Четвертый технологический уклад привел к наиболее высоким за всю историю темпам мирового экономического роста до 4,9 % в период с 1950 по 1973 гг. Фаза депрессии четвертого цикла заняла период с 1973 по 1982 гг. При переходе от четвертого к пятому циклу объем мирового производства упал почти на 11 % [9]. С 1997 г. началось некоторое оживление экономики, и пошел пятый цикл Н. Д. Кондратьева. Ядром пятого технологического уклада стали микроэлектроника, персональные компьютеры, информатика и биотехнологии. Эффективность пятого технологического уклада, основанного на инновациях предыдущего цикла, оказалась ниже: среднегодовые темпы прироста ВВП мирового производства в 1983–2001 гг. снизились и составили 3,1 % [9]. Ю. В. Яковец [6] полагает, что экономический кризис, имевший начало в 2001–2002 гг., ознаменовал переход от повышательной стадии пятого Кондратьевского цикла к понижательной стадии, предвещая новые кризисы и депрессию. Действительно, темпы прироста ВВП в развитых странах мира в 2001–2005 гг. снизились до 2 % против 2,5 % в 1991–2000 гг. Начавшийся в 2007 г. мировой финансовый кризис, вызванный проблемами банковской системы, перекинулся в сферу реальной экономики и привел к дальнейшему замедлению темпов роста большинства развитых и развивающихся экономик мира. В табл. 1, 2 представлены индексы мирового экономического климата за период с 01 января 2009 г. до 01 октября 2010 г., рассчитанные к уровню 2005 г. [10]. Из данных табл. 1, 2 видно, что несмотря на ожидания и прогнозы, опросы IFO 1087 экономических экспертов из 113 стран мира свидетельствуют, что индекс экономического климата продолжает снижаться, и пессимистические ожидания на ближайшую перспективу не изменились. Взлёт и падение цен на энергоносители, образование и крах финансовых пузырей – верные признаки завершающей фазы жизненного цикла доминирующего технического уклада и начала структурной перестройки экономики на основе следующего – шестого технологического уклада, становление и рост которого будут определять глобальное развитие в ближайшие два-три десятилетия.

Таблица 1

Мировой экономический климат (2005 г. = 100 %), (%)

Наименование показателя	Период, в годах							
	1 кв. 2009	2 кв. 2009	3 кв. 2009	4 кв. 2009	1 кв. 2010	2 кв. 2010	3 кв. 2010	4 кв. 2010
Климат	50,7	65,2	79,6	91,4	99,5	104,1	103,2	98,6
Ситуация	46,7	39,3	43,0	54,2	67,3	80,4	93,5	95,3
Ожидания	54,4	89,5	114,0	126,3	129,8	126,3	112,3	101,8

Примечание. Источник: IFO и CES

Таблица 2

Экономический климат в регионах мира (2005 г. = 100 %), (%)

Наименование показателя	Период, в годах							
	1 кв. 2009	2 кв. 2009	3 кв. 2009	4 кв. 2009	1 кв. 2010	2 кв. 2010	3 кв. 2010	4 кв. 2010
Климат	46,0	66,9	78,7	85,4	90,4	95,4	88,7	82,8
Ситуация	52,6	64,5	76,4	89,3	98,3	99,3	102,2	105,2
Ожидания	47,4	69,3	89,5	101,8	108,8	113,2	107,9	95,6

Примечание. Источник: IFO и CES

Следовательно, мировая экономика стоит на пороге фазы депрессии, которая, скорее всего, продлится с 2010 по 2020–2030 гг. Этот период является самым благоприятным временем для освоения и внедрения новой волны базисных технологических инноваций. Но формирование воспроизводственного контура нового технологического уклада – длительный процесс. В настоящее время шестой технологический уклад выходит из эмбриональной фазы развития в фазу роста, и уже видны его ключевые факторы – нанотехнологии, клеточные технологии и методы генной инженерии, опирающиеся на использование электронных растровых и атомно-силовых микроскопов, соответствующих метрологических систем. Его ядро образуют наноэлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы и наноструктурированные покрытия, нанобиотехнологии, наносистемная техника, нанооборудование. Несмотря на кризис, темп роста производства в этих направлениях не снижается и составляет 30–70 % в год [10; 11]. Наряду с отраслями, формирующими ядро нового технологического уклада, подъём охватит его несущие отрасли. В их числе и несущие отрасли предшествующего уклада: электротехническая, авиационная, ракетно-космическая, атомная промышленность, приборостроение, станкостроение, образование, связь. Кроме того, новый технологический уклад распространится на здравоохранение (эффективность которого многократно возрастет с применением клеточных технологий и методов диагностики генетически обусловленных болезней) и сельское хозяйство (благодаря применению достижений молекулярной биологии и генной инженерии), а также проявится в создании новых материалов с заранее заданными свойствами; благодаря появлению наноматериалов в число несущих отраслей также войдут химико-металлургический комплекс, строительство, судо- и автомобилестроение, авиапром и молекулярная биология [11]. А. А. Акаев в своей работе [12] делает важный практический вывод: успех государственной инновационной политики целиком зависит от способности правительства предвидеть и активно содействовать инновационному процессу в периоды депрессии и оживления, когда имеет место синергетический эффект его усиления. Напротив, если поддержка правительства осуществляется с запозданием, эффективность экономики от внедрения инноваций значительно снижается.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– изучение места и роли инновационных технологий в развитии экономических систем имеет свою историю, в результате которой сложились некоторые представления об их особенностях и характеристиках;

– волновые колебания экономических циклов обусловлены взаимодействием макроотрослей, формирующих процесс перманентной эволюции экономики, который связан со сменой поколений технических средств производства;

– долгосрочный экономический цикл отражает развитие инноваций в виде смены технологических укладов;

– традиционный подход позволяет строить модели циклов с использованием инструментов математической статистики, которые создают основу для получения прогнозных данных, но не в состоянии объяснить новые факты и тенденции взаимодействия инноваций и циклического развития экономики; в связи с этим, некорректно искать причины экономической цикличности в простой смене направлений динамики основных макроэкономических показателей;

– фундаментальные исследования в области природы, характера и развития циклических колебаний экономики не следует проводить без учета развития их качественных составляющих (инновационного развития);

– дальнейшие исследования в этой области позволят получить некоторые теоретические выводы и практические рекомендации для развития экономической науки и экономики России.

Библиографические ссылки

1. Кондратьев Н. Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М. : Экономика, 2002.

2. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М. : Прогресс, 1982.

3. Freeman C. Technical Innovation, Diffusion, and Long Cycles of Economic Development. The Long-Wave Debate / ed. by T. Vasko. Berlin : Springer, 1987. P. 295–309.

4. Мэнсфилд Э. Экономика научно-технического прогресса. М. : Прогресс, 1970.

5. Hirooka M. Innovation Dynamism and Economic Growth. A Nonlinear Perspective. Cheltenham. Northampton (MA) : Edward Elgar, 2006.

6. Яковец Ю. В. Эпохальные инновации XXI в. М. : Экономика, 2004.

7. Глазьев С. Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития : монография. М. : ВлаДар, 1993.

8. Mensch G. Stalemate in Technology – Innovations Overcome the Depression. N. Y. : Ballinger, 1979.

9. OECD = Organization for Economic Cooperation and Development 2008 [Electronic resource]. URL: http://www.oecd.org/statsportal/0,3352,en_2825_293564_1_1_1_1_1,00.html.

10. Обзор экономических показателей [Электронный ресурс]. URL: http//www.financy.ru/t/post 1292318904.html.

11. Глазьев С. Ю. На пороге шестого технологического уклада [Электронный ресурс]. URL: http://www.glazev.ru/econom_polit/233.

12. Акаев А. А.Системный мониторинг: Глобальное и региональное развитие / под ред. Д. А. Халтурина, А. В. Коротаева. М. : УРСС, 2009. С. 141–162.

V. A. Ivannikov

PLACE AND ROLE OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN DEVELOPMENT OF ECONOMIC SYSTEM

Existing concepts of the role of innovations in wave development of economy are generalized, analysis of various opinions is presented, conceptual approaches to their estimation from the point of view of the modern economic theory are defined.

Keywords: recurrence theory, a business cycle, innovative technologies, economic system.

© Иванников В. А., 2011

УДК 339.137.2

Е. А. Калашникова

ОЦЕНКА ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА КАК ФАКТОРА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВУЗА

Рассматривается инновационный потенциал как один из основных факторов конкурентоспособности высшего учебного заведения. Даны понятия «конкурентоспособность» и «инновационный потенциал вуза». Обоснована актуальность проблемы, выделены факторы конкурентоспособности вуза. Выявлены группы показателей для оценки уровня инновационного потенциала вуза.

Ключевые слова: высшее учебное заведение, конкурентоспособность, инновационный потенциал.

В развитых и ряде развивающихся стран инновационный потенциал высоко ценится, рассматривается в качестве источника экономического развития и является основной составляющей национального богатства. Проблемы формирования, функционирования и использования инновационного потенциала вузов актуальны для России, так как недооценка инновационного потенциала, его недостаточное использование, затрудняют реализацию обозначенной правительством страны стратегии формирования национальной инновационной системы и сдерживают процесс развития конкурентоспособной системы образования и социально ориентированной рыночной экономики [1].

В настоящее время особую важность и актуальность приобретает вопрос конкурентоспособности высшего образования, основанной на использовании инновационного потенциала, который имеет определяющее значение для успешного развития как регионов, так и России в целом. Проблема повышения конкурентоспособности вузов обусловливает необходимость проведения ее оценки. Оценка конкурентоспособности вузов постепенно приобретает самостоятельное значение, нуждается в дальнейшей проработке научно-категориального аппарата, выявления специфических черт, присущих высшему учебному заведению как субъекту рынка образовательных услуг. Все большую значимость приобретают вопросы адаптации вуза к рыночным условиям хозяйствования, повышения его конкурентоспособности на основе использования инновационного потенциала.

Чтобы добиться конкурентоспособности вузу необходимо посредством менеджмента создать такие

условия, которые способствовали бы появлению и развитию новшеств. Первым шагом в этом может стать выбор наиболее точного и объективного инструмента управления организацией, одним из которых может служить оценка конкурентоспособности вуза по его инновационному потенциалу.

Объектом исследования являются государственные высшие учебные заведения.

Образовательное учреждение является частью сферы образования, входящей в одну из сфер народного хозяйства. Развитие рыночных отношений в России коренным образом изменило экономические условия функционирования государственных вузов. Ключевым моментом деятельности вуза является организация работ по повышению собственной конкурентоспособности [2].

В подходах экономистов при определении сущности конкурентоспособности имеют место существенные различия. Основная задача каждого исследователя состоит в выявлении факторов конкурентоспособности, которые являются ее основой.

Некоторые авторы, Р. А. Фатхутдинов, Д. С. Воронов, В. В. Криворотов, утверждают, что универсального понятия конкурентоспособности не может быть, все зависит от того, применительно к какому объекту или субъекту (товару, услуге, фирме, отрасли, стране) оно относится [3; 4].

Автор предлагает рассматривать конкурентоспособность вуза как его возможность эффективно распоряжаться собственным инновационным потенциалом в условиях конкурентного рынка, а также оказывать образовательные услуги соответствующего уровня, удовлетворяющие потребностям общества, студентов, организаций, предприятий и государства.

В рамках проведенного автором исследования выявлено, что на положение вуза на рынке образовательных услуг в каждый определенный момент времени влияет множество факторов, которые в конечном итоге и определяют его конкурентоспособность.

Автором были выделены три основных фактора конкурентоспособности вуза: инновационный потенциал, цена образовательных услуг, имидж вуза.

В связи с тем, что выделенные факторы оказывают неодинаковое влияние, неравнозначны по характеру и по своей природе необходимо рассмотреть сущность каждого выбранного конкретного фактора конкурентоспособности вуза.

Существует несколько определений инновационного потенциала вуза.

О. В. Васюхин, Е. А. Павлова определяют инновационный потенциал вуза как его готовность выполнить задачи, обеспечивающие достижение поставленной инновационной цели посредством реализации инновационного проекта или программы инновационных преобразований и внедрения инноваций. Данное определение учитывает такую составляющую инновационного потенциала, как наличие возможностей выполнить задачи, которые обеспечат достижение целей вуза, но не дадут возможности понять, что именно подразумевается под готовностью к выполнению задач вузом, на чем строится возможность реализации инновационных проектов.

М. В. Владыка дал следующее определение: «Инновационный потенциал вузов представляет собой системную совокупность взаимодействующих и взаимосвязанных инновационных ресурсов сектора высшей школы, необходимых в процессе осуществления инновационной деятельности с учетом их ограниченного характера и возможного (положительного или отрицательного) влияния на конечный результат деятельности, а также фактор реализации конкурентных преимуществ высшей школы, ее инвестиционно-инновационной привлекательности». Определение дает представление об инновационном потенциале как о факторе реализации конкурентных преимуществ, который может способствовать повышению инвестиционно-инновационной привлекательности вуза и всей высшей школы. Категория определяется как система инновационных ресурсов, при этом в понятии не отражено, какие ресурсы включает система и какие ресурсы могут быть признаны инновационными, чтобы войти в систему.

Е. Е. Шестернинов инновационный потенциал образовательной системы рассматривает как «совокупность ее свойств, обеспечивающих возможность эффективного решения проблем развития образования, которые не могут быть решены путем использования ранее известных (традиционных) подходов и средств». Определение основано на том, что инновационный потенциал должен обеспечивать решение проблем развития образования. Ограничением является то, что главный аспект в определении – совокупность свойств образовательной системы, но при этом не ясно какие именно свойства должны обеспечивать эффективные решения.

Приведем также определения двух дополнительных факторов, выделенных автором.

Цена образовательных услуг представляет собой денежное выражение стоимости произведенных услуг.

Имидж вуза – это его образ, складывающийся у общественности, партнеров и студентов.

В настоящее время существует проблема отсутствия инструмента, позволяющего провести объективную комплексную оценку конкурентоспособности, дающего возможность учесть не только характеристики внутренней среды вуза, но и его положение во внешней среде, его оценку участниками рынка образовательных услуг.

Инновационный потенциал в рамках проведенного исследования включает три группы показателей:

– показатели оценки уровня кадрового потенциала;

– показатели оценки уровня образовательного потенциала;

– показатели оценки уровня научно-инновационного потенциала.

Для каждой группы были выбраны показатели, которые обладают нормативными значениями и информация об этих значениях является доступной. Группы включают показатели, отражающие состояние внутренней среды вуза и позволяющие провести объективную оценку.

Как уже упоминалось выше для оценки конкурентоспособности были выделены помимо фактора под названием инновационный потенциал такие факторы как цена и имидж вуза.

Выявленные факторы, влияющие на конкурентоспособность вуза, являются, во-первых, разнородными, а, во-вторых, измеряются в различных единицах, свернуть их в один показатель используя линейный функциональный вид нельзя. Поэтому для выполнения оценки конкурентоспособности вуза были использованы методы теории нечетких множеств. Методы, базирующиеся на теории нечетких множеств,позволяют обрабатывать разнородную информацию, характерную для реальных задач связанных с оценкой конкурентоспособности вузов.Приведем алгоритм проведения оценки конкурентоспособности вуза, представленный на рисунке.

Первый этап. На деятельность вуза влияет огромное количество факторов. Проведенный анализ существующих методик оценки конкурентоспособности вуза и организаций, оказывающих услуги и содержащих разные системы факторов и показателей, позволил выделить три основных фактора, которые оказывают наибольшее влияние на уровень конкурентоспособности вуза.

Второй этап. Выявленные в ходе исследования факторы конкурентоспособности не являются равнозначными. Для того чтобы провести их ранжирование мы воспользовались методом экспертных оценок. На основе опроса экспертов было проведено ранжирование факторов и показателей по отношению друг к другу, что в дальнейшем стало основой для присвоения весов каждому фактору и показателю.

Третий этап. В соответствии с выявленными факторами конкурентоспособности вуза, а также группами показателей, которые включает инновационный потенциал, была сформирована система показателей для оценки влияния факторов на конкурентоспособность вуза в виде таблицы.

Четвертый и пятый этапы. Для проведения оценки и определения влияния каждого выявленного в ходе исследования фактора и показателя было установлено три количественных интервала, дающих возможность определить уровень конкурентоспособности вуза по отдельным факторам и показателям. Каждому количественному интервалу в свою очередь соответствует определенный уровень конкурентоспособности – низкий, средний либо высокий. Исходя из установленных количественных интервалов и уровней конкурентоспособности для них, а также определения единиц измерения для каждого фактора и показателя была построена шкала.

Автором даны пояснения, что значит отнесение полученных после проведения расчетов количественных значений к определенному уровню конкурентоспособности.

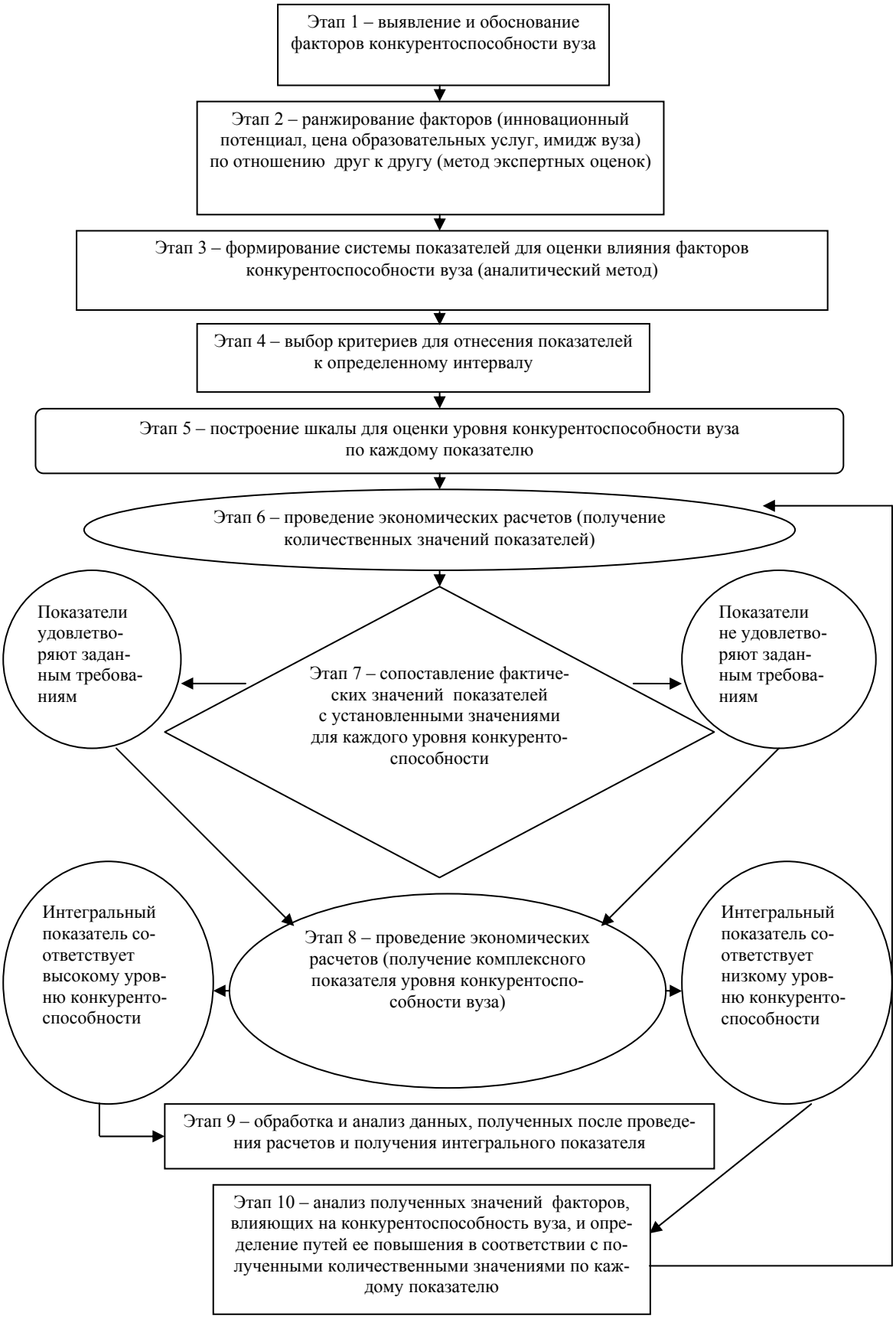
Низкому уровню показателя конкурентоспособности соответствует значение «слабо конкурентоспособный», что означает то, что вузу присущи самые минимальные значения основных показателей. Например, что касается показателей, которые входят в состав фактора «инновационный потенциал»: если вуз обладает низким уровнем конкурентоспособности по данному фактору, то это значит, что аккредитационные показатели соответствуют нормативным значениям, установленным в Федеральном приказе РФ «Об утверждении показателей деятельности и критериев государственной аккредитации высших учебных заведений». В упомянутом приказе представлены нормативные значения показателей, но с оговоркой «не менее», что говорит о том, что данные значения являются самыми минимальными для прохождения аккредитации вузом.

Среднему уровню конкурентоспособности вуза соответствует значение «достаточно конкурентоспособный» и это говорит о том, что фактические значения показателей больше минимальных нормативных значений. А также, что касается показателей, не имеющих нормативных значений, то это значит, что показатели обладают средними значениями в соответствии с проведенным анализом статистических данных и опросов непосредственных потребителей образовательных услуг, т. е. средними по региону.

Высокому уровню конкурентоспособности вуза соответствует значение «высоко конкурентоспособный» и это означает, что фактические значения каждого показателя и фактора конкурентоспособности вуза значительно превышают нормативные значения, что говорит о том, что вуз функционирует эффективно и имеет положительную динамику, так как многие аккредитационные показатели рассчитываются за пять лет функционирования вуза и являются результирующими показателями. А что касается показателей, не имеющих нормативных значений, то отнесение к высокому уровню конкурентоспособности говорит о том, что их фактические значения в соответствии с данными статистики и проведенных автором опросов являются высокими и соответствуют установленному для данного уровня количественному интервалу. Также необходимо отметить, что количественные интервалы, соответствующие высокому уровню конкурентоспособности вуза, были сформированы на основании анализа данных тех вузов, которые прошли конкурсный отбор программ развития университетов, в отношении которых устанавливается категория «национальный исследовательский университет».

Шестой этап. На основании установленных фактических значений каждого показателя, входящего в группы показателей для оценки инновационного потенциала, необходимо провести расчеты и определить уровень каждой из трех групп факторов, а затем рассчитать значение фактора «инновационный потенциал» по формулам.

Седьмой этап. В соответствии с полученными количественными значениями на основании проведенных расчетов необходимо построить матрицу принадлежности, значения которой войдут в формулу для расчета комплексного показателя уровня конкурентоспособности вуза.



Алгоритм проведения оценки конкурентоспособности вуза

Восьмой этап. Проведение экономических расчетов и получение комплексного показателя уровня конкурентоспособности вуза в соответствии с предлагаемой формулой.

Девятый и десятый этапы. На основании данных, полученных после проведенной оценки конкурентоспособности вуза, в случае если интегральный показатель не отвечает требованиям, проводится анализ всех количественных значений факторов и осуществляются мероприятия для улучшения значений, а затем проводится повторная оценка конкурентоспособности вуза.

Задача эксперта – грамотно составить систему новостных факторов и наложить на нее непротиворечивую систему предпочтений одних факторов другим.

Инновационный потенциал является неотъемлемым фактором конкурентоспособности вуза. Руководству вуза необходимо иметь в своем распоряжении инструменты оценки конкурентоспособности для получения корректных оценок влияния инновационного потенциала на обеспечение его конкурентоспособности. Оценка инновационного потенциала как фактора конкурентоспособности вуза обеспечит эффективное распоряжение всей совокупностью имеющихся у него ресурсов и реализацию на практике инновационных проектов, обеспечивающих достижение поставленных инновационных целей.

Библиографические ссылки

1. Тумина Т. А. Инновационное развитие – основа экономического роста. СПб. : Химиздат, 2008.

2. Азоев Г. Л. Конкуренция: анализ, стратегия и практика. М. : Центр экономики и маркетинга, 2006.

3. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент. М. : Дело, 2007.

4. Воронов Д. С., Криворотов В. В. Конкурентоспособность предприятия: оценка, анализ, пути повышения. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001.

E. A. Kalashnikova

ESTIMATION OF INNOVATIVE POTENTIAL AS FACTOR OF COMPETITIVENESS OF HIGH SCHOOL

In article the innovative potential as one of major factors of competitiveness of a higher educational institution is considered. Concepts «competitiveness» and «innovative potential of high school» are given. The problem urgency is proved, factors of competitiveness of high school are allocated. Groups of indicators for an estimation of level of innovative potential of high school are revealed.

Keywords: a higher educational institution, competitiveness, innovative potential.

© Калашникова Е. А., 2011

УДК 338.3.001.76

А. В. Кондрин, В. В. Кукарцев

СТРАТЕГИЯ ВНЕДРЕНИЯ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматривается стратегия внедрения CALS-технологии, описаны основные этапы этой стратегии.

Ключевые слова: CALS-технологя, жизненный цикл продукции, PDM-системы.

Эффективный бизнес сегодняшнего дня имеет явную тенденцию к географической распределенности. Компании кооперируются для того, чтобы вместе выполнить сложный проект или вывести на рынок новый продукт. Возникают так называемые «виртуальные» предприятия – форма объединения на контрактной основе предприятий и организаций, участвующих в поддержке жизненного цикла общего продукта и связанных общими бизнес-процессами. Этот сложный организм должен жить по единым правилам в едином информационном пространстве, позволяющем непосредственно использовать данные в электронной форме от партнеров и передавать им, в свою очередь, результаты своей работы.

CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support – непрерывные поставки и поддержка жизненного цикла изделия) – это идеология создания единой информационной среды для процессов проектирования, производства, испытаний, поставки и эксплуатации продукции. Системность информационного подхода заключается в охвате всех стадий жизненного цикла продукции от замысла до утилизации.

Интеграция достигается путем стандартизации представления информации в процессах проектирования, материально-технического снабжения, производства, ремонта, послепродажного сервиса и т. д. Такой подход создает новый базис для информационной интеграции и преемственности в использовании информации.

В случае изменения состава участников – смены поставщиков или исполнителей – обеспечивается преемственность и сохранность уже полученных результатов (моделей, расчетов, документации, баз данных). CALS-технологии представляют собой современную организацию процессов разработки, производства, послепродажного сервиса, эксплуатации изделий путем информационной поддержки процессов их жизненного цикла на основе стандартизации методов представления данных на каждой стадии жизненного цикла и безбумажного электронного обмена данными. Цель применения CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства продукта и пользования им – повышение эффективности их деятельности за счет ускорения процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах ее эксплуатации и технического обслуживания.

Концепция CALS определяет набор правил, регламентов, стандартов, в соответствии с которыми строится информационное взаимодействие участников процессов проектирования, производства, испытаний и т. д. Суть концепции CALS необычайно проста – она состоит в создании единой интегрированной модели изделия. Такая модель должна отражать все аспекты изделия и сопровождать его на всем протяжении жизненного цикла от замысла до утилизации. Под понятием «единая модель» подразумевается модель, содержащая всю информацию об изделии, требуемую на любом из этапов жизненного цикла. Под понятием «интегрированная» подразумевается модель, при построении каждого из фрагментов которой используются единые средства и методы, обеспечивающие целостность всей модели, описывающей изделие. Упрощенная общая структура интегрированной модели приведена на рис. 1.

В современных условиях CALS-технологии являются важнейшим инструментом повышения эффективности бизнеса, конкурентоспособности и привлекательности продукции.

CALS-технологии активно применяются, прежде всего, при разработке и производстве сложной наукоемкой продукции, создаваемой интегрированными промышленными структурами, включающими в себя НИИ, КБ, основных подрядчиков, субподрядчиков, поставщиков готовой продукции, потребителей, предприятия технического обслуживания, ремонта и утилизации продукции. Вместе с тем, применение CALS-технологий позволяет эффективно, в едином ключе решать проблемы обеспечения качества выпускаемой продукции, поскольку электронное описание процессов разработки, производства, монтажа и т. д. полностью соответствует требованиям международных стандартов ИСО серии 9 000, реализация которых гарантирует выпуск высококачественной продукции. В США работы по CALS-технологиям ведутся с 1985 г. в рамках национальной программы. Началом создания системы CALS-технологий стала разработка системы стандартов описания процессов на всех этапах жизненного цикла продукции. В период 1985–1990 гг. была разработана национальная концепция развития системы CALS-технологий и апробированы ее основные составляющие. В 1991–1995 гг. велись крупномасштабные испытания разработанных CALS-технологий в процессе производства отдельных видов вооружения и военной техники (ВВТ). В настоящее время в США перспективные виды ВВТ разрабатываются только на основе указанных технологий. Министерство внешней торговли и промышленности Японии приступило к осуществлению широкомасштабной программы разработки, испытаний и внедрения системы CALS. Программа объединяет более 20 взаимосвязанных проектов, охватывающих различные отрасли экономики, включая авиационно-космическую, судостроительную, электронную, автомобилестроительную, финансовую и др. Наряду с частными инвестициями на реализацию указанной программы, государство ежегодно выделяет около 200 млн долл. При этом государственная поддержка полностью увязана с общей стратегией реализации новейших информационных технологий и нацелена на обеспечение конкурентоспособности национальных товаров на мировых рынках.

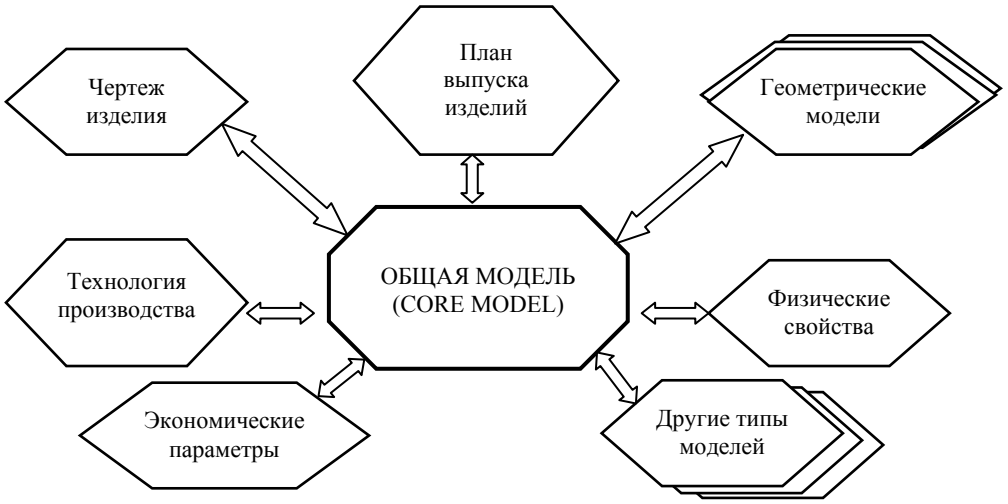


Рис. 1. Упрощенная структура интегрированной модели изделия

По данным западных аналитиков, применение CALS-технологий позволяет в масштабах промышленности США экономить десятки миллиардов долларов в год, сокращать сроки проведения всех работ на 15–20 %. В этой связи в промышленно развитых странах в области CALS активно реализуются широкомасштабные программы, направляемые и координируемые государственными структурами. Сейчас в мире действует более 25 национальных организаций (комитетов или советов по развитию CALS), в том числе в США, Японии, Канаде, Великобритании, Германии, Швеции, Норвегии, Австралии и других странах, а также в НАТО.

Стандартный способ представления конструкторско-технологических данных позволяет решить проблему обмена информацией между различными подразделениями предприятия, а также участниками кооперации, оснащенными разнородными системами проектирования. Использование международных стандартов обеспечивает корректную интерпретацию хранимой информации, возможность оперативной передачи функций одного подрядчика другому, который, в свою очередь, может воспользоваться результатами уже проделанной работы. Это особенно важно для изделий с длительным жизненным циклом, когда необходимо обеспечить преемственность информационной поддержки продукта, независимо от складывающейся рыночной или политической ситуации. Чтобы CALS-технологии стали давать ощутимую отдачу, следует разработать продуманную стратегию внедрения этих технологий, связанную с технологическим процессом производства, и четко следовать ей. Предположительная схема внедрения CALS-технологий на предприятии представлена на рис. 2.

На первой стадии формируется рабочая группа. Рабочая группа должна включать как сотрудников производственных отделов предприятия (конструкторов, технологов и т. п.), так и специалистов отдела автоматизации (программистов и системных аналитиков). Все сотрудники рабочей группы должны пройти обучение по соответствующим CALS-технологиям и программным продуктам. Для сохранения преемственности решений целесообразно иметь рабочую группу с постоянным составом в течение всего процесса внедрения CALS-технологий.

Далее необходимо провести анализ существующих на предприятии бизнес-процессов и их информационного обеспечения. Цель анализа – выявить существующее взаимодействие между бизнес-процессами и оценить их рациональность и эффективность. Для этой цели разрабатываются функциональные модели, содержащие детальное описание выполняющихся процессов в их взаимосвязи. С их помощью решается целый ряд задач, связанных с оптимизацией, оценкой величины и распределением затрат, оценкой производительности, загрузки и сбалансированности составных частей производства.

Рис. 2. Основные этапы внедрения CALS-технологий на предприятии

На основе проведенного анализа формируется концепция интеграции в информационное пространство посредством внедрения CALS-технологий на предприятии. Формирование концепции включает выбор показателей оценки эффективности процессов, формирование целей внедрения CALS-технологий и стратегии их достижения. Основными показателями являются конкурентоспособность (или качество) продукции, затраты и длительность процессов разработки и освоения производства изделия.

После формирования концепции интеграции необходимо провести реинжиниринг бизнес-процессов производственного предприятия, который должен быть направлен на внедрение организационных методов разработки изделий, таких как параллельное проектирование, единое информационное пространство, междисциплинарные группы.

Инжиниринг бизнеса – это набор приемов и методов, которые компания использует для проектирования бизнеса в соответствии со своими целями. Реинжиниринг – это фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование деловых процессов для достижения резких, скачкообразных улучшений главных современных показателей деятельности компании, таких как стоимость, качество, сервис и темпы (термин «реинжиниринг» ввел М. Хаммер).

В процессе реинжиниринга специалисты должны переосмыслить текущие правила и положения ведения бизнеса и часто оказывающиеся устаревшими, ошибочными или неуместными. Реинжиниринг не применяется в тех случаях, когда необходимо улучшение либо увеличение показателей деятельности компании на 10–100 %, а используются более традиционные методы, применение которых не сопряжено со значительным риском. Реинжиниринг целесообразен только в тех случаях, когда требуется достичь резкого улучшения показателей деятельности компании (500–1000 % и более) путем замены старых методов управлении новыми.

Параллельно с проведением реинжиниринга бизнес-процессов на основе выработанной концепции необходимо выбрать и приобрести PDM (Product Data Management) – систему и технические средства. PDM-система – это система организации бизнес-процессов в пределах специальных задач в области разработки, инженерного анализа и технологической подготовки производства. PDM-системы выполняют следующие основные функции:

– хранение проектных данных и доступ к ним, в том числе ведение распределенных архивов документов, их поиск, редактирование, маршрутизация, создание спецификаций;

– поиск, структурирование и визуализация данных;

– управление конфигурацией изделия, т. е. ведение версий проекта, управление внесением изменений;

– управление проектированием (проектами), обеспечение совместной работы разработчиков над проектом;

– защита информации;

– интеграция данных (поддержка типовых форматов, конвертирование данных).

Основной компонент систем PDM – банк данных. Он состоит из системы управления базами данных и баз данных. Межпрограммный интерфейс в значительной мере реализуется через информационный обмен с помощью банка данных. PDM отличает легкость доступа к иерархически организованным данным, обслуживание запросов, выдача ответов не только в текстовой, но и в графической форме, привязанной к конструкции изделия. Поскольку взаимодействие внутри группы проектировщиков в основном осуществляется через обмен данными, то в системе PDM часто совмещают функции управления данными и управления параллельным проектированием.

В информационных моделях приложений фигурируют сущности (типы данных) и связи между ними. Установление сущностей, их атрибутов, связей и атрибутов связей означает структурирование проектных данных. Структура изделий обычно может быть представлена иерархически, в виде дерева. Иерархическая форма удобна при внесении и отслеживании изменений в модели, например, при добавлении и удалении сущностей, изменениях их атрибутов, введении новых связей. Поэтому одной из первоочередных функций PDM является поддержка интерактивной работы пользователя при создании моделей изделий (процессов), структурирование описаний проектируемых объектов, предъявление пользователю этой иерархической структуры вместе с возможностями навигации по дереву и получению нужной информации по каждой указанной пользователем структурной компоненте.

Целостность данных поддерживается в процессе управления конфигурацией проекта, а также тем, что нельзя одновременно изменять один и тот же объект разным разработчикам, каждый из них должен работать со своей рабочей версией. Другими словами, необходимо обеспечение синхронизации изменения данных, разделяемых многими пользователями.

Следующими важными функциями PDM являются управление документами и документооборотом. Проектная документация характеризуется разноплановостью и большими объемами. В процессе проектирования используют чертежи, конструкторские спецификации, пояснительные записки, ведомости применяемости изделий, различного рода отчеты. Кроме того, в интегрированных автоматизированных системах проектирования и управления в документооборот входит большое число документов, связанных с процедурами маркетинга, снабжения, планирования, администрирования и т. п. Важно обеспечить автоматический учет влияния и распространения вносимых в проект изменений на другие части проектной документации.

Следует отметить, что параллельное проектирование (совмещенное проектирование), интеграция автоматизированных систем проектирования и управления на современных предприятиях возможны только в распределенной среде. Данные проекта при этом находятся в хранилищах данных, т. е. в нескольких базах распределенного банка данных.

PDM-системы давно уже доказали высокую эффективность своего применения в качестве инструмента объединения усилий конструкторов, технологов и других специалистов, а также зарекомендовали себя действенным средством организации параллельной работы над проектом и инструментом внедрения CALS-технологий. Задачей PDM-системы является аккумулирование всей информации об изделии (услуге), создаваемой прикладными системами, в единую логическую модель. Системы управления данными об изделии (PDM-системы) в настоящее время достаточно широко реализованы и представлены на рынке. Поэтому перед каждым предприятием будет стоять задача, какую систему выбрать и как ее применять для решения конкретных задач. В любом случае предприятие должно осознавать, что оно приобретает не просто компьютерную программу, а целый пакет услуг. Поэтому необходимо учитывать не только качества самой PDM-системы, но и способность ее производителя (или дилера) обеспечить ее сопровождение, модернизацию и адаптацию к потребностям предприятия. Правильно подобранная PDM-система способна сократить срок разработки и внедрения на производство новых изделий на 50 % и уменьшить стоимость обработки информации на 40 %. После проведения реинжиниринга бизнес-процессов и приобретения PDM-системы и технических средств происходит разработка комплекса нормативной документации, регламентирующей порядок ввода и изменения информации об изделии в PDM-систему на основе международных стандартов. Для создания на предприятии единого информационного пространства необходимо интегрировать приобретенную PDM-систему с уже существующими компьютерными системами. Кроме того, при внедрении необходимо учесть специфические условия функционирования предприятия.

Внедрение CALS-технологий – сложный, многогранный процесс, связанный с различными аспектами деятельности организации. Для эффективного использования накопленного предприятием производственного опыта требуются значительные затраты на перевод существующей документации на разработанные изделия в стандартное представление и занесение ее в хранилище данных интегрированной информационной системы с использованием средств адаптации. Необходима готовность руководства и персонала предприятия к внедрению CALS-технологий, а также наличие необходимых средств. Несмотря на трудности, инвестиции на внедрение CALS-технологий всегда оправданы, приводят к существенной экономии и получению дополнительной прибыли, а также повышают эффективность управления инновационной деятельностью на предприятии.

A. V. Kondrin, V. V. Kukartsev

CALS-TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION STRATEGY

In the article the authors consider the CALS-technologies implementation strategy and outline the key steps of this strategy.

Keywords: CALS-technologies, production life-cycle, PDM-systems.

© Кондрин А. В., Кукарцев В. В.. 2011

УДК 330.131.7

А. А. Краснощек

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Предлагается проводить анализ и оценку экономической безопасности на основе потенциала экономической безопасности. При этом данный потенциал рассматривается как результат трансформаций количественных характеристик в качественные показатели эффективности деятельности предприятия, а также взаимообусловленности внешних и внутренних трансакций в этом процессе. Трансакционный подход используется в рамках функционального анализа денежных потоков.

Ключевые слова: экономическая безопасность, потенциал, анализ, денежный поток.

Анализ экономической безопасности предполагает, в первую очередь, идентификацию угроз, которым подвержен исследуемый хозяйствующий субъект.

Угрозы экономической безопасности принято подразделять на внешние и внутренние (внешние чаще всего связывают с факторами волатильности стоимости денежного измерителя, недобросовестной конкуренцией, а также с правовыми аспектами деятельности, включенными в общую институциональную среду организации; внутренние угрозы, как правило, связывают с состоянием активов и обязательств, отраженных в бухгалтерском балансе). Необходимо отметить, что для анализа используются данные и других отчетных форм, что, на наш взгляд, способно исказить общую оценку экономической безопасности вследствие несопоставимости данных, поскольку бухгалтерский баланс содержит в себе данные об остатках исследуемых объектов, тогда как отчеты о движе-

нии денежных средств и о прибылях и убытках содержат информацию о потоках финансовых и прочих ресурсов, опосредующих движение объектов исследования.

Таким образом, первостепенной задачей анализа экономической безопасности является выбор объектов и инструментов исследования, и, поскольку экономическая безопасность представляет собой динамическую категорию анализа, то объектом исследования необходимо признать потоки ресурсов организации, способные приспосабливаться к изменениям внешней и внутренней среды.

Под экономической безопасностью организации, в свою очередь, мы признаем способ организации индивидуального воспроизводства капитала, при котором в каждый конкретный момент времени обеспечивается такая структура активов и обязательств, которая соответствует критериальным показателям:

– отсутствие тесной детерминированной зависимости между ростом показателей доходности и сокращением прочих показателей эффективности финансово-хозяйственной деятельности;

– одинаковая скорость обращения активов и обязательств в соответствии со степенью срочности;

– незначительный уровень корреляции между объемом выручки и скоростью обращения дебиторской задолженности;

– невозможность единоличного принятия управленческих решений с целью извлечения личной выгоды;

– стабильная структура и стоимость внешних и внутренних трансакций;

– незначительный уровень корреляции скорости оборота кредиторской задолженности и роста затрат на основную производственную деятельность;

– наличие неценовых способов повышения выручки;

– положительная динамика показателей экономической добавленной стоимости, рентабельности капитала, скорректированной на уровень риска и чистого денежного потока от основной деятельности.

Анализ трудов, посвященных оценке экономической безопасности, показывает, что большинство авторов позиционируют экономическую безопасность как нахождение некоторого компромисса между ростом доходности и сокращением риска, как компромисса в агентских отношениях, как нахождение оптимального соотношения между различными показателями производственной, деловой и рыночной активности.

Синтезируя теоретические основы оценки уровня экономической безопасности, можно следующим образом сгруппировать основные подходы к определению показателей экономической безопасности.

1. *Ресурсный* (*инвестиционный*) *подход* представляет собой совокупность методов описания и анализа экономической безопасности на основании достаточности и доступности финансирования затрат, необходимых для осуществления производственного процесса, а также отдачи от вложенных ресурсов. Данный подход апеллирует к категориям инвестиционного анализа. Общеизвестно, что процесс внедрения инвестиций должен быть оправдан с экономической точки зрения. На этапе планирования инвестиционной деятельности предприятия имеют возможность оценить только соотношение требуемых затрат на осуществление инвестиций и прогнозного уровня полезного эффекта, рассчитанного исходя из выбранного критерия эффективности и обеспечения безопасности на уровне соотношения достаточности и отдачи от ресурсов (капитализация дохода, NPV, CCF, FCF, APV, SAPV, ROV, NOPAT, EBIT, EVA, MVA, SVA, CFROI, CVA и т. д.).

2. *Циклический подход* основан на применении теории экономических циклов на основании длинных, средних и коротких волн экономического развития. При этом угрозы экономической безопасности образуются на стыке таких волн и реализуются в форме перехода к новому циклу экономического развития либо потерей конкурентных преимуществ.

3. *Системный подход* определяет экономическую безопасность как совокупность элементов, составляющих его структуру. К основным элементам, определяющим уровень экономической безопасности, относят производственный, кадровый, организационный, научно-технический, интеллектуальный, инвестиционный и финансовый потенциалы. На основании уровня значимости каждого из элементов и количественного измерения состояния элемента определяется совокупный уровень экономической безопасности предприятия.

4. *Кластерный* (*инфраструктурный*) *подход* определяет экономическую безопасность как способность системы за счет обеспечивающих ее факторов (в том числе инфраструктурных) достигать определенных заданных целей (например, качества экономического роста, качества продукции, объема рынка, диверсификации продукции, конкурентных преимуществ, минимизации риска платежеспособности или экономических убытков, роста стоимости бизнеса, роста рыночной капитализации, сокращения издержек и т. д.).

5. В качестве дополнения к перечисленным подходам нами предлагается метод анализа динамики показателей, с целью оценки потенциала экономической безопасности, а именно *процессный подход*, который характеризует уровень экономической безопасности как синергетический эффект движения потоков ресурсов; за счет наличия этого эффекта достигается возможность своевременной реакции на реализацию фактических угроз внутренней и внешней среды, сохранение положительной динамики экономического роста, а также устойчивость к кризисным явлениям.

Для оценки уровня экономической безопасности с точки зрения способности осуществления своевременных рыночных переходов и для предотвращения последствий реализации угроз, нами предлагается использовать понятие «потенциал экономической безопасности», что отражено на модели структурно-логических зависимостей (рис. 1).

Приведенная схема характеризует наличие потенциала экономической безопасности, возникающего за счет трансформаций количественных характеристик в качественные показатели эффективности деятельности, а также взаимообусловленность внешних и внутренних трансакций.

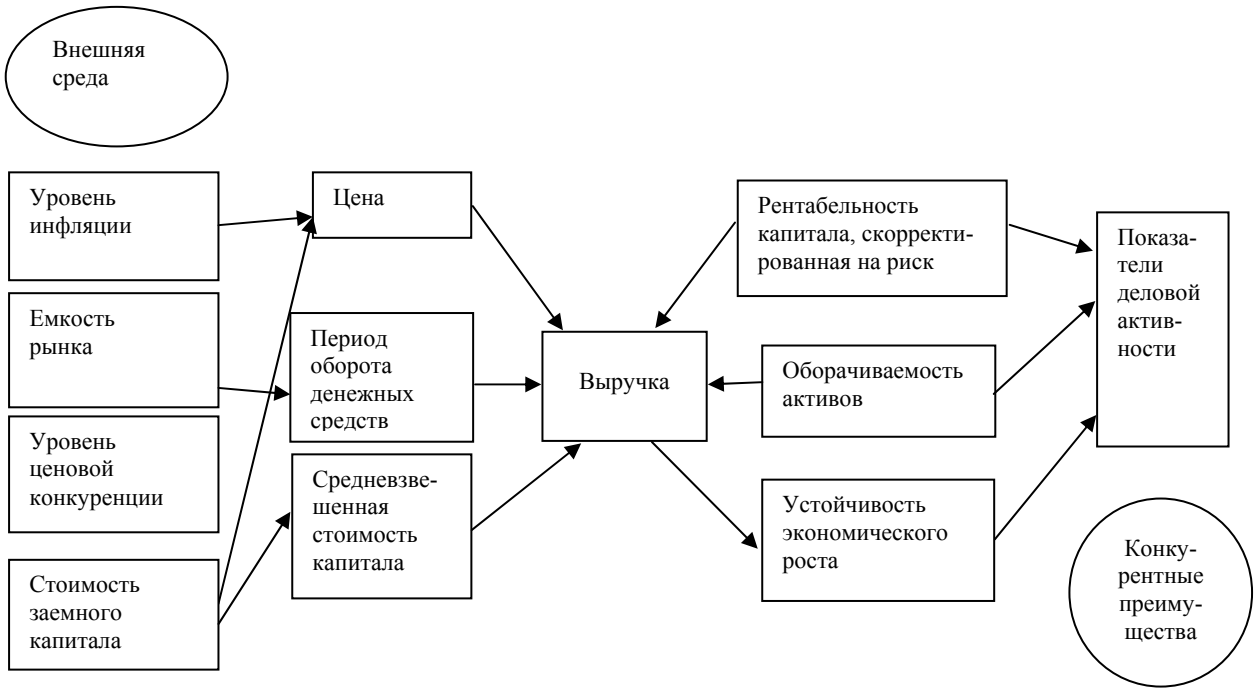


Рис. 1. Трансформация угроз в потенциал экономической безопасности

В качестве количественного интегрированного показателя потенциала экономической безопасности предлагается использовать среднее геометрическое значение парных коэффициентов корреляции между элементами схемы. Следует заметить, что в зависимости от уровня экономического развития и конкретных условий хозяйствования элементы схемы могут изменяться.

В связи с этим, расчет показателя потенциала экономической безопасности предлагается осуществлять с использованием следующей формулы:

$$k_{\text{пэ}} = \sqrt[n]{KK_{\text{кач}}} - \sqrt[m]{KK_{\text{кол}}},$$

где $k_{\text{пэ}}$ – коэффициент потенциала экономической безопасности; $KK_{\text{кач}}$ – произведение коэффициентов корреляции между показателями роста конкурентных преимуществ; $KK_{\text{кол}}$ – произведение коэффициентов корреляции между показателями приспособления к явлениям внешней среды, при этом если n и m – четные числа, то используется формула арифметической средней (рис. 1).

В любом случае, высокий уровень дисперсии между исследуемыми показателями говорит об отсутствии потенциала экономической безопасности и сокращении полезности оборота потоков ресурсов.

С целью развития теории институционального происхождения экономической безопасности в рамках динамического подхода, для оценки стабильности и устойчивости динамики организации нами предлагается использование трансакционного подхода в рамках функционального анализа денежных потоков, поскольку денежное обращение – это наиболее мобильный поток ресурсов, динамика потенциала экономической безопасности наиболее наглядно проявляется именно в движении денежных потоков.

Деньги как носитель капитала обращения являются объектом институционального анализа, поскольку они обеспечивают возможность осуществления трансакций, опосредуя товарный обмен. Роль денег может изменяться в зависимости от объема выполняемых ими функций: деньги являются порождением товарного хозяйства и представляют товар сам по себе, специфическая потребительская стоимость которого состоит в том, чтобы быть всеобщим эквивалентом всех товаров.

Для наглядности изобразим рыночные трансакции, опосредующие движение капитала обращения, с точки зрения функций денег (рис. 2).

На рисунке справа трансакции идентичны транзакциям, обозначенным слева, но осуществляются с отсрочкой платежа.

Одной из основных угроз экономической безопасности является, на наш взгляд, потеря независимости от контрагентов, причем не только с юридической стороны, а с точки зрения «изъятия реального содержания посредством использования ценового механизма» [1]. Из чего следует, что за счет институциональных проблем, связанных с организацией движения денежных потоков, осуществляется перераспределение реального капитала в пользу контрагентов с более стабильной и одновременно динамичной структурой трансакций.

Очевидно, что в современных условиях функционирование денег как средства платежа выгодно в случае покупки в кредит, и невыгодно в случае продажи в кредит. Также не требует дополнительного обоснования целесообразность увеличения скорости оборота средств обращения и возникновения косвенных потерь в случае длительного хранения ликвидных остатков.

Механизм ценового изъятия на уровне организации состоит, на наш взгляд, в следующем: произведенная фирмой стоимость имеет некоторую цену в текущих денежных единицах исходя из заданного масштаба цен и положения на рынке. Денежные единицы в процессе обращения, т. е. смены собственника, меняют и покупательную способность. При дальнейшем обращении в некоторые стоимости (с учетом накопления покупательная способность денежных единиц меняется сильнее) может быть изъята часть созданной реальной стоимости в пользу покупателей и продавцов в зависимости от положения на рынке.

Такие переходы возможны в силу того, что деньги в разных трансакциях выполняют разные переходы из одного качественного состояния в другое. В этих разных состояниях владельцы денег обладают разной степенью приспосабливаемости в зависимости от положения на рынке.

Индикатором перераспределения капитала в пользу контрагентов в таком случае будут изменения в структуре трансакций в следующем воспроизводственном цикле, т. е., если на определенную созданную стоимость при некоторой мере стоимости будет приходиться относительно меньшее или большее число трансакций, чем в предыдущем цикле, то можно говорить о перераспределительных процессах. Причем направления этих процессов зависят от производимых трансакций и перекосов в пользу того или иного качественного состояния капитала обращения.

Изменение структуры трансакций говорит о процессе приспособления фирмы к инерции общественного воспроизводства, однако в результате этого приспособления возрастают «затраты на использование ценового механизма» (см. таблицу).

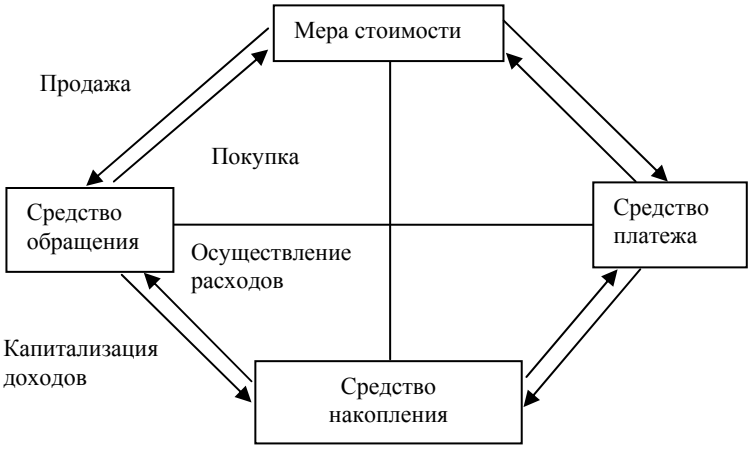


Рис. 2. Рыночные трансакции с точки зрения функций денег

Ценовой способ изъятия на основе функций денег

Функция денег	Трансакции покупки товаров	Трансакции продажи товаров
Меры стоимости	Если стоимость приобретаемых товаров значительно ниже их контрактной цены, то стоимость произведенных и реализованных фирмой товаров в процессе обращения изымается в обмен на меньшую стоимость, т. е. капитал не воспроизводится	Если единица приобретаемых и реализуемых товаров обращается по одной цене, но стоимость продаваемых товаров выше, то разница в стоимостях посредством этой функции перераспределяется в пользу продавцов
Средства обращения	Инфляционные процессы неодинаковы на различных рынках. В силу разной мобильности рынков и скорости приспособления покупка товаров может посредством функции денег как средства обращения изъять часть реальной стоимости в пользу продавца товаров, если цены на рынках его факторов производства приспосабливаются к изменениям медленнее, чем его собственные цены	Продажа товаров в условиях инфляции всегда грозит перераспределением капитала в пользу покупателя, если цена на продаваемый товар не формируется под влиянием инфляции издержек
Средства накопления	Если трансакции осуществляются за счет ранее сбереженных средств, то это с учетом непрерывного обесценения (даже при хранении денег на депозитных счетах) осуществляется за счет потери части стоимости капитала, потраченного для осуществления этих сбережений	Если сберегаются средства, полученные в результате трансакции продажи товаров, то это сокращает сберегаемую стоимость в условиях инфляции, т. е. перераспределяет капитал, но не в пользу покупателей, а в пользу предпочтения ликвидности
Средства платежа	Чем больше отсрочка платежа, тем большая стоимость сберегается при обмене	Чем больше отсрочка платежа, тем большая стоимость теряется при обмене

По теореме Коуза в этом случае фирма должна увеличивать количество функций, заменяя рыночный обмен внутренним, однако такое увеличение не всегда возможно [2].

Затраты на использование рыночного механизма можно сократить поддерживая постоянную структуру трансакций перехода между функциями денег при неизменном количестве функций в самой фирме. Изменения структуры трансакций могут быть оправданы только изменением числа или качественных характеристик функций, выполняемых в рамках хозяйственной системы данной фирмы.

Библиографические ссылки

1. Сенчагов В. К. Стратегические цели и механизм обеспечения экономической безопасности // Проблемы теории и практики управления. 2009. № 3. С. 18–23.

2. Чалдаева Л. А. О понятии экономической безопасности компании // Финансы и кредит. 2009. № 4. С. 72–75.

A. A. Krasnoshchek

SOME ASPECTS OF ANALYSIS AND EVALUATION OF ECONOMIC SECURITY

The author proposes to analyze and evaluate the economic security, based on the potential economic security. This potential is considered to be a result of transformation of quantitative characteristics to qualitative performance of an enterprise, along with interdependence of external and internal transactions in this process. Transactional approach is used within the boundaries of the functional analysis of cash flows.

Keywords: economic security, potential, analysis, cash flow.

© Краснощек А. А., 2011

УДК 338.2

А. В. Кукарцев, В. И. Яшкин

АНАЛИЗ ИНСТУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ СОВРЕМЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Рассматриваются такие инструменты управления бизнес-процессами как цепочка создания ценностей, матрица разделения административных задач управления, система показателей и регламентация. Определяются преимущества и ограничения данных инструментов.

Ключевые слова: бизнес-процесс, матрица, разу, регламентация.

Для того чтобы правильно управлять бизнес-процессами на предприятии необходимо рассмотреть и проанализировать существующие инструменты управления. На основе общего анализа выявляются преимущества и недостатки инструментов управления, и делается выбор наиболее подходящего для дальнейшего использования (внедрения) на предприятии.

Первый инструмент управления бизнес-процессами на предприятии, который мы рассмотрим, это концепция цепочек ценностей (added value chain). Как считал Майкл Портер – автор концепции, при проведении стратегического анализа и выборе стратегии компании целесообразно обратиться именно к цепочке создания ценностей (ЦСЦ).

М. Портер выделяет пять первичных и четыре вторичных действия (процесса), составляющих такую цепочку на любом предприятии. В число первичных процессов он включает [1]:

– материально-техническое обеспечение деятельности компании;

– производственные процессы;

– материально-техническое обеспечение сбыта;

– маркетинг и продажи;

– обслуживание.

К вторичным, или поддерживающим, процессам М. Портер относит:

– закупки;

– развитие технологии;

– управление человеческими ресурсами;

– поддержание инфраструктуры компании.

Набор процессов, входящих в стандартную цепочку ценности, согласно М. Портеру, может служить лишь отправной точкой для выделения уникальных цепочек ценностей, свойственных для конкретной компании. Следует отметить, что подходы практически всех ведущих международных консалтинговых компаний к выделению и анализу бизнес-процессов базируются на концепции М. Портера.

При анализе уникальных цепочек ценностей конкретной организации следует учитывать следующие особенности ее бизнеса и методов выделения цепочек:

– у одного предприятия может быть выделено столько цепочек ценностей, сколько групп (видов) продуктов и услуг она поставляет внешним потребителям;

– на верхнем уровне цепочки ценности, выделяемые для различных предприятий, а также для различных групп продуктов и услуг одной и той же организации, могут оказаться схожими;

– деятельность конкретного предприятия будет охватывать только часть цепочки ценности, в рамках которой создается продукт или услуга для конечного потребителя.

Ценность продукта процесса является относительной категорией. Для ее определения всегда важно понять, кто является потребителем продуктов или услуг, создаваемых в рамках процесса.

Чтобы правильно выделить и проанализировать цепочки ценностей предприятия и тех процессов, которые входят в их состав, можно предложить следующий подход [1]:

1) выделить границы, в рамках которых компания планирует выстраивать ЦСЦ, в том числе:

– составить список всех существующих и перспективных товаров (услуг), предлагаемых в отрасли, в которой работает предприятие;

– сгруппировать эти товары (услуги) по категориям, позволяющим провести их однозначную идентификацию;

– сгруппировать клиентов на основе их потребностей в указанных товарах (услугах);

– составить список потребителей, с которыми предприятие работает в настоящее время и хотело бы сотрудничать в перспективе;

– определить номенклатуру продуктов (услуг) предприятия, которые смогут удовлетворить потребности указанного круга клиентов;

2) выделить и описать ЦСЦ на уровне процессов верхнего уровня;

3) провести анализ ЦСЦ по отношению к цепочкам основных конкурентов;

4) исключить из портфеля бизнесов компании продукты (услуги) и цепочки, не имеющие конкурентоспособных перспектив. Оптимизировать те цепочки, по которым предприятие имеет сильные позиции в настоящем либо привлекательные перспективы в будущем.

Путем анализа может быть обосновано формирование новых, дополнительных цепочек создания ценности (процессов).

В результате реорганизации цепочек создания ценности и процессов в соответствии с потребностями имеющихся и перспективных клиентов предприятие сможет усилить свою конкурентную позицию на рынке и заложить основу для развития бизнеса на долгосрочную перспективу.

Следующий рассматриваемый инструмент управления бизнес-процессами предприятия – матрица разделения административных задач управления (РАЗУ), разработанная одноименным автором. Данную матрицу составляют для того, чтобы уточнить состав служебных функций, которые должен выполнять управленческий и обслуживающий персонал, и распределить эти функции между отдельными исполнителями и структурными единицами. Матрица РАЗУ может охватывать как весь персонал предприятия, так и персонал в отдельных направлениях (блоках) [2].

В строках матрицы записывают служебные функции (основные задачи), которые необходимо выполнять для нормальной деятельности предприятия. Служебная функция – наиболее весомый и регулярно выполняемый комплекс работ. Служебные функции, закрепленные за каким-либо подразделением, вносят в положение об этом подразделении. Служебные функции, закрепленные за каким-либо должностным лицом, отражаются в должностной инструкции этого лица.

В столбцах матрицы указывают подразделения и (или) отдельных исполнителей. Для малого предприятия обычно указывают все подразделения и отдельных руководителей (исполнителей). Для средних и крупных предприятий составляют несколько матриц РАЗУ для каждого направления (блока) в отдельности. В этом случае в столбцах будут обозначены только те подразделения, руководители и исполнители, которые входят в рассматриваемый блок. На пересечении строки и столбца показывают степень участия конкретного подразделения или лица в выполнении конкретной служебной функции. Для этого применяют следующие условные обозначения [2]:

У – утверждение документов;

К – контроль исполнения и координация;

Р – разработка документов;

С – участие в виде согласования (визирования документов);

И – информационное обеспечение.

Матрица разделения административных задач управления для экономико-финансовой службы предприятия представлена в табл. 1.

Последующий анализ составленной матрицы РАЗУ позволяет решить следующие задачи:

– установить меру ответственности за исполнение каждой служебной функции со стороны соответствующих подразделений и должностных лиц;

– выявить подразделения и лица, как перегруженные множеством разнородных функций, так и слабо нагруженные;

– предложить изменения в организационной структуре по перераспределению функций, укрупнению или разукрупнению подразделений, изменению численности персонала и т. д.;

– устранить дублирование в выполнении служебных функций.

Следующий инструмент – система показателей предприятия, разработанных для нескольких уровней управления. При построении такой системы показателей целесообразно принять во внимание несколько принципов, которые представлены ниже [1].

Принцип 1. Система показателей должна быть построена с учетом стратегии развития предприятия. Если собственниками организации определена стратегия ее развития, то при разработке системы целей и показателей она обязательно должна учитываться. Для целей анализа можно условно разделить все показатели на несколько групп, которые представлены в табл. 2.

Таблица 1

Матрица разделения административных задач управления для экономико-финансовой службы предприятия

Служебные функции	Генеральный директор	Главный менеджер	Менеджер по регионам	Главный бухгалтер
Поиск и отбор необходимой информации	К	Р	С	
Своевременное приобретение специализированных изданий	К, У	Р	С	У
Обеспечение фирмы современным программным обеспечением	К, У	Р	С	У
Анализ информации, расчеты, выводы, предоставление результатов	К	И	Р	
Разработка вариантов стратегии в соответствии с целями и задачами	К, У	И	С	
Оценка эффективности деятельности фирмы	К	И	И	
Ведение финансовой деятельности фирмы	К, У			Р
Организация делопроизводства	К, У			С
Подготовка образцов документов	К, У			

Таблица 2

Группы показателей

Наименование группы	Пример показателя	Стратегия	Бизнес-процесс
Общие индикативные показатели уровня компании	Выручка, прибыль, рентабельность активов	В общем виде характеризуют достижение стратегических целей	Не могут характеризовать отдельные процессы
Показатели уровня компании, ориентированные на стратегию	Средний срок поставки продукции потребителю, скорость обновления ассортимента	Непосредственно характеризуют достижение стратегических целей компании	Могут характеризовать отдельные процессы
Показатели уровня компании, характеризующие операционную эффективность	Длительность производственного цикла, средний уровень брака, доля полезной загрузки оборудования	Могут характеризовать достижение стратегических целей	Могут характеризовать отдельные процессы

В первую группу условно отнесены общие индикативные показатели уровня компании. В целом они могут характеризовать достижение стратегических целей предприятия. Но с их помощью невозможно анализировать отдельные процессы и принимать конкретные управленческие решения. Можно только констатировать изменение состояния предприятия. Показатели этой группы, как правило, всегда присутствуют в системе показателей любого предприятия.

Вторая группа представляет собой совокупность показателей, непосредственно характеризующих достижение стратегических целей предприятия, т. е. ориентированных на стратегию. Если стратегические цели четко сформулированы, а методы их достижения конкретны (не употребляются такие размытые формулировки, как например, увеличение продаж), то показатели этой группы также будут конкретными и понятными. Важно отметить, что эти показатели отражают результат выполнения конкретных и понятных руководству решений на уровне предприятия. Если стратегия предприятия выражена нечетко, то и показатели этой группы будут, скорее всего, индикативными.

Показатели третьей группы характеризуют операционную эффективность. Они могут рассчитываться и анализироваться независимо от того, есть у предприятия стратегия или нет. Необходимо повышать эффективность деятельности предприятия, поэтому и показатели этой группы нужны для целей управления. В отдельных случаях данные показатели могут использоваться для анализа достижения стратегических целей, но в основном они ориентированы на принятие конкретных решений по отношению к процессам предприятия.

Следует отметить, что четких граней между указанными выше группами не существует. Один и тот же показатель может характеризовать и степень достижения стратегических целей, и операционную эффективность. Более того, в условиях одной компании показатель будет рассматриваться как индикативный, а в другой – вполне конкретно отражать улучшения по бизнес-процессам [1].

Принцип 2. Система показателей должна обеспечивать измерение операционной эффективности независимо от стратегии. Независимо от того, есть ли у предприятия четко сформулированная стратегия, необходимо измерять операционную эффективность её процессов.

Собственники вкладывают в предприятие свой или заемный капитал. Эффективность его использования для них всегда является важнейшим показателем при принятии управленческих решений. Под результативностью понимается отношение полученного фактического результата деятельности к планируемому. Эффективность определяется как отношение полученного фактического результата деятельности к использованным для его достижения ресурсам.

В табл. 3 представлены различные отношения между показателями плановых и фактических результатов, планируемых и использованных ресурсов. Таблица поясняет определения результативности и эффективности. Ресурсы, показанные в таблице, могут быть представлены как затраты, время и пр.

Таблица 3

Результативность и эффективность деятельности

Показатели	Плановые результаты	Фактические результаты	Планируемые ресурсы	Использованные ресурсы
Плановые результаты	–	Результативность	Плановая эффективность	Не определяется
Фактические результаты	Результативность	–	Не определяется	Фактическая эффективность
Планируемые ресурсы	Плановая эффективность	Не определяется	–	Не определяется
Использованные ресурсы	Не определяется	Фактическая эффективность	Не определяется	–

Всегда необходимо определять показатели результативности и эффективности процессов, но попытки это сделать терпят неудачу по нескольким причинам [1]:

– сложно подобрать «прозрачные» показатели эффективности;

– для расчета показателей эффективности нет данных;

– руководители не заинтересованы рассчитывать показатели эффективности и отчитываться по ним.

Принцип 3. Система показателей должна давать возможность измерять удовлетворенность клиентов компании. Корректно оценить удовлетворенность клиентов непросто. Существуют прямые и косвенные методы такой оценки. К прямым методам относится анализ полученных рекламаций или анкет по оценке деятельности предприятия, заполненных потребителями. Косвенные методы оценки базируются на динамике изменения таких показателей, как общий объем продаж компании, объем продаж отдельному потребителю (из числа крупных клиентов), увеличение числа клиентов, длительность деловых связей, количество повторных обращений и пр.

На практике целесообразно сочетать прямые и косвенные методы оценки удовлетворенности клиентов. К сожалению, на многих предприятиях этот показатель анализируется формально. Основным критерием удовлетворенности служит рост объема продаж, но когда этот объем начинает сокращаться, приступать к анализу причин снижения удовлетворенности клиентов уже поздно. К этому времени конкуренты успевают существенно потеснить предприятие на рынке.

Принцип 4. Комплексный подход при разработке показателей для каждого процесса. При разработке рассматриваются показатели трех категорий:

– показатели, измеряемые деньгами (например, затраты на процесс);

– показатели времени (например, время выполнения процесса);

– технические показатели (например, доля дефектов).

При разработке системы показателей по процессу с помощью показателей, измеряемых деньгами, можно оценить практически все ресурсы, которые требуются для выполнения процесса. К их числу могут быть отнесены сырье и материалы, труд сотрудников, энергоносители и т. п. Показателями, измеряемыми деньгами, в данном случае будут затраты соответствующего вида. В качестве показателей времени могут служить, например, среднее время выполнения процесса в целом и (или) отдельных его операций.

Технические показатели необходимы для измерения соответствия выполнения процесса и его результатов требований. Самый простой пример такого показателя – уровень брака или расход материалов на единицу изделия (для разных технологий производства одного и того же продукта он будет различным). В качестве требований могут рассматриваться требования, установленные как самим предприятием, так и ее потребителями, а также сложившиеся в данной отрасли значения отдельных показателей, характеризующие бизнес как высокоэффективный. Очевидно, что такие показатели относительны и могут существенно отличаться на разных рынках, в различных регионах, странах и т. п.

Принцип 5. Снижение количества показателей в системе показателей предприятия. Каждый показатель должен использоваться для принятия управленческих решений. Разработка множества показателей, которые впоследствии невозможно рассчитывать или использовать, является бессмысленной, не добавляющей ценности работой. К сожалению, в последние годы в компаниях появляется множество сложных и непрозрачных систем показателей. Сотни показателей в таких системах попадают в управленческие отчеты, но реально для принятия управленческих решений не применяются. Стоит посмотреть, как использовалась система показателей предприятия в течение определенного периода (например, квартала), и выяснить, какие решения принимались по каждому показателю. Те показатели операционной эффективности, по которым решений не было, необходимо проанализировать более тщательно и оценить, насколько они нужны для управления. Следует отметить, что причиной неиспользования показателей для принятия решений может быть неумение или нежелание менеджеров применять их для анализа и улучшения процессов.

В результате, цели и показатели, разработанные для отдельных подразделений, могут противоречить друг другу и задачам предприятия в целом. В такой системе показателей будет отсутствовать синергия, чего не происходит, если при разработке системы по-

казателей учитываются сквозные процессы. Конечно, создавать систему показателей, базируясь на организационной структуре, гораздо проще и быстрее. Но привязка показателей к процессам, особенно межфункциональным, исключительно важна, и о ней не следует забывать [1].

Последний инструмент управления бизнес процессами предприятия, который мы рассмотрим это регламентация. Она подразумевает разработку нормативно-методических документов, частично или полностью устанавливающих порядок управления бизнес-процессом, порядок его выполнения, а так же требование к ресурсам, необходимым для его выполнения.

Регламентация процессов как важнейший инструмент создания стабильной, эффективно работающей компании дает возможность не только обеспечить прозрачность и порядок при осуществлении деятельности, но и реализовать проекты расширения бизнеса [1].

При регламентации процесса следует учитывать его основные элементы:

1) деятельность по управлению процессом:

– владелец процесса и его полномочия;

– технология управления процессом (как минимум – планирование и отчетность);

– система показателей для управления процессом;

2) входы процесса:

– требования к входам;

– события, инициирующие начало процесса;

3) выходы процесса:

– требования к выходам (результатам);

– события, завершающие процесс;

4) деятельность по преобразованию входов и выходов (технология выполнения процесса):

– ответственность персонала;

– выполнение операций (как часть деятельности по бизнес-процессу);

5) ресурсы, необходимые для выполнения процесса:

– персонал;

– инфраструктура;

– оборудование;

– информация и пр.

Существуют также базовые принципы регламентации бизнес-процессов. Они могут оказаться полезными при решении практических задач регламентации, но их нельзя назвать всеобщими или универсальными [1].

Принцип 1. Регламентировать только то, что действительно необходимо. На многих предприятиях пытаются описывать и регламентировать процессы, не разобравшись с существующей базой документов, что в дальнейшем порождает еще большие проблемы. Понимание нужной степени регламентации является достаточно сложной задачей для руководителей предприятий.

Принцип 2. Стремиться к простоте. Когда на предприятиях создают нормативно-методические документы по процессам, эти документы получаются чрезмерно объемными, сложными по структуре и содержат много ненужной информации. Это происходит потому, что те, кто пишет нормативные документы, сами их не исполняют; иногда не хватает времени на подготовку хорошо проработанного документа; многие руководители не заинтересованы в изменении процессов.

Принцип 3. «Лучше толще, но меньше». Если есть такая возможность, лучше сделать один толстый документ, чем 20 тонких. Нормативно-методические документы нужно поддерживать в актуальном состоянии. Сотрудники, на которых распространяется область действия этих документов, должны быть в курсе последних изменений.

Принцип 4. Учет квалификации персонала и культуры предприятия. Если на предприятии высококвалифицированные, ответственные за свою работу сотрудники, то документы не потребуется слишком детализировать. Что касается «культуры», на многих предприятиях её элементами является пренебрежительное отношение к нормативным документам, неисполнение приказов, неуважительное отношение к руководителям. Всё это препятствует эффективному использованию регламентов для повышения эффективности деятельности.

Принцип 5. Перенесение акцента при детализации процессов с описания управления на детальное описание технологии выполнения процесса. При переходе от описания процессов на верхнем уровне к детальному описанию процессов акцент смещается с регламентации управления на регламентацию технологии выполнения процесса.

Таким образом, происходит переход от описания ответственности и полномочий руководителей, технологии управления процессом и системы показателей к составлению документа, руководствуясь которым можно выполнить процесс и получить на выходе заданные результаты [1].

Каждый инструмент имеет свою область применения. Преимущества и ограничения инструментов управления бизнес-процессами предприятия описаны в табл. 4.

Регламентация позволяет создавать информационно-документарную базу деятельности предприятия при управлении бизнес-процессами, описывает все процессы на предприятии. Также, посредством этого инструмента управления бизнес-процессами предприятия, каждому сотруднику определяется ответственность в тех процессах, за которые он отвечает или в которых принимает участие.

Библиографические ссылки

1. Репин В. В. Бизнес-процессы компании: построение, анализ, регламентация. М. : Стандарты и качество, 2007. (Серия «Практический менеджмент»).

2. Уткин Э. А., Кочеткова А. И. Бизнес-план. Как развернуть собственное дело. М. : Тандем, 2001. С. 38–42.

Таблица 4

Преимущества и ограничения инструментов управления бизнес-процессами предприятия

Инструменты	Преимущества	Ограничения
Цепочка создания ценностей	Фокус анализа на результате (продуктах, услугах) процессов, четкость и логика при определении управляющих процессов и непрерывная увязка деятельности подразделений «сквозным» образом, т. е. цепочки ценности, являются межфункциональными. Возможность построения системы бизнес-процессов организации	Сложность схем для визуального восприятия, схемы не показывают динамику бизнес-процессов, сложно осуществить привязку процессов ко времени выполнения, например, показать одновременно выполняемые процессы
Матрица РАЗУ	Есть возможность установить меру ответственности за исполнение каждой служебной функции со стороны соответствующих подразделений и должностных лиц. Можно предложить изменения в организационной структуре по перераспределению функций, укрупнению или разукрупнению подразделений, изменению численности персонала и т. д. Помогает устранить дублирование в выполнении служебных функций	Узкая область использования данного инструмента. Однако в области инструментов управления бизнес-процессами предприятия он эффективен
Система показателей	Помогает согласовать интересы сотрудников на различных уровнях внутри организации. Показывает, есть ли на предприятии заинтересованные сотрудники в развитии и обучении. Указывает на эффективность процессов (операционное направление) и удовлетворенность клиентов	Использование только финансовых показателей стимулирует достижение лишь краткосрочных результатов. Финансовые показатели плохо подходят для управления предприятием, деятельность которого сильно связана со знаниями
Регламентация	Обеспечивает прозрачность и порядок при осуществлении деятельности, Наличие эффективной методики регламентации, учитывающей описанные принципы, а также квалифицированных сотрудников, способных применять её на практике, является важнейшим фактором успеха предприятия в условиях постоянно меняющихся внутренней и внешней средах	

A. V. Kukartsev, V. I. Yashkin

ANALYSIS OF TOOLS FOR MANAGING BUSINESS PROCESSES OF MODERN ENTERPRISE

In this article we consider tools for managing business processes management, such as value chain, matrix separation of administrative tasks management, the system of indicators and regulations. Benefits and limitations of these instruments (tools) is defined.

Keywords: business process, razu matrix, regulation.

© Кукарцев А. В., Яшкин В. И., 2011

УДК 378.2:378.142

Е. Э. Лобанова

КЛАССИФИКАЦИЯ СЛУЖБ СОДЕЙСТВИЯ ЗАНЯТОСТИ ВЫПУСКНИКОВ УЧРЕЖДЕНИЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЫНКА УСЛУГ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ И РЫНКА ТРУДА

Обоснована актуальность содействия занятости выпускников учреждений профессионального образования самим учреждением профессионального образования. Представлена классификация служб, осуществляющих этот процесс, ее основные элементы.

Ключевые слова: учреждение профессионального образования, занятость, выпускник, служба.

Проблема занятости выпускников учреждений профессионального образования (ВУПО), возникнув с переходом России к рыночной системе, не утратила свою актуальность на протяжении всего периода рыночного реформирования до настоящего времени. Более того, в условиях начавшегося в России (с середины 2008 г.) финансово-экономического кризиса актуальность проблемы значительно возросла, так как именно выпускники УПО при первичном выходе на рынок труда (РТ) испытывают наибольшие трудности с трудоустройством. В 2009 г. на рынок труда России должно было выйти почти 1,5 млн выпускников очной формы обучения. С учетом имеющейся предварительной информации о местах трудоустройства выпускников имели риск быть нетрудоустроенными 11 % выпускников ВПО, 10 % выпускников СПО и 10 % выпускников НПО [1]. На наш взгляд, содействие занятости выпускников должно быть неотъемлемой частью деятельности учреждения профессионального образования (УПО), которое является активным и важнейшим субъектом сегмента взаимодействия рынка услуг профессионального образования (РУПО) и РТ. В решении проблем взаимодействия РУПО и РТ нам представляется наиболее значимой быстро формирующаяся и развивающаяся система содействия трудоустройству ВУПО в самой системе профессионального образования России. Процессы изучения этих структур (служб содействия занятости ВУПО в системе профессионального образования) представляют как научный, так и практический интерес в области развития маркетинга образовательных услуг, сферы услуг, рынка труда выпускников и молодых специалистов, направлений взаимодействия РУПО и РТ, в том числе и на региональном уровне. Развитие организационных структур по содействию занятости учащейся молодежи в системе образования РФ началось относительно недавно (с 1998–1999 гг.). В настоящее время в 317 вузах (из 345), подведомственных Рособразованию, и более чем в половине образовательных учреждений среднего профессионального образования в 468 (из 803) созданы службы содействия трудоустройству выпускников [1]. Методологические и методические основы содействия занятости выпускников УПО не являются полными и завершенными. Важным элементом в разработке этих основ является систематизация и дифференциация практики деятельности базового элемента государственной системы содействия занятости выпускников в системе профессионального образования, а именно специальной службы УПО, реализующей такое содействие. Методологически эти процессы могут осуществляться посредством классификации этих служб, что дает возможность упорядочивания применяемых методов и технологий деятельности служб, выявление слабых и сильных сторон их деятельности с целью ее совершенствования. Первая попытка классификации таких служб принадлежит Е. П. Ильясову, осуществленная в рамках предложенной им и реализованной Рособразованием концепции системы государственного содействия занятости ВУПО. Деление организационных форм – Центров содействия занятости учащейся молодежи (ЦСЗУМ) – идет по уровням управления и решаемым задачам [2]. Однако, сложившаяся практика деятельности самих ЦСЗУМов и других структур, реализующих элементы содействия занятости ВУПО, оказалась значительно шире этой классификации. Поэтому целесообразно более детальное изучение их деятельности посредством нового подхода к их классификации. Процесс классификации осуществлялся нами по следующей схеме:

1) выбор критериев отбора форм элемента механизма содействия занятости ВУПО;

2) отбор форм по данному элементу механизма содействия занятости ВУПО;

3) классификация форм по данному элементу механизма содействия занятости ВУПО.

В качестве критериев отбора форм элемента механизма содействия занятости ВУПО в сфере профессионального образования была взята совокупность признаков, характеризующих связь изучаемого элемента с процессами формирования конкурентоспособности выпускника, способствующей его успешной адаптации на рынке труда и эффективной занятости. Под эффективной занятостью выпускников мы понимаем процесс их трудоустройства по специальности в оптимальные сроки, сопровождающийся успешной адаптацией в коллективе, профессиональным ростом и экономической результативностью для работодателя. Критерии отбора организационных форм элемента механизма содействия занятости ВУПО (далее – служб) конкретизируется через следующие признаки:

– наличие организационных начал или самоорганизации в деятельности форм изучаемого элемента;

– принадлежность к системе профессионального образования;

– связь с формированием и развитием маркетинговой деятельности УПО;

– содействие повышению конкурентоспособности ВУПО;

– оказание психологической, социальной поддержки ВУПО;

– содействие занятости учащейся молодежи, ВУПО, молодых специалистов.

Изучение опыта функционирования 75 УПО (2005 г.) позволило Е. Э. Лобановой предложить классификацию служб по 7 признакам (см. таблицу).

Представленная классификация не является окончательной и статичной, так как процесс формирования и создания новых форм содействия занятости ВУПО в системе профессионального образования России идет активно, поэтому по мере накопления опыта деятельности новых форм возможна ее корректировка. В частности, группировка служб по первому, второму и седьмому признаку в настоящее время с учетом дополнительных исследований (в соавторстве с Е. И. Востровой) существенно нами расширена и углублена (исследования касаются 122-х вузов, 20-ти колледжей и техникумов, 4-х профессиональных лицеев и училищ). Как показывает практика деятельности служб УПО для эффективного взаимодействия РУПО и РТ важна и необходима маркетинговая составляющая их деятельности. Именно это направление деятельности активно развивается в последние годы, что позволяет, в свою очередь, предложить классификацию развивающихся служб маркетинга УПО, при этом деятельность выделенных служб (назовем их далее службы маркетинга) прямо или косвенно связана с процессом содействия занятости ВУПО. В дополнение к первому признаку разработанной ранее классификации маркетинговую составляющую их деятельности можно классифицировать следующим образом:

– 1.1 – с функциональной организационной структурой. Подобные службы имеют разветвленную организационную структуру. В нее могут входить несколько групп, каждая из которых ответственна за определенный круг задачи (в Ульяновском государственном университете (УлГУ). Задачи маркетинга реализуются с помощью структур управления маркетинга: лаборатория маркетинговых и социологических исследований, отдел рекламы, студия телевидения, пресс-центр);

– 1.2 – с линейной структурой управления. К данной классификационной группе относятся службы маркетинга, которые действуют на уровне всего УПО. Они выполняют большой спектр маркетинговых задач в сфере образования, в том числе и по трудоустройству выпускников.

Классификация служб содействия решению проблем занятости выпускников УПО в системе профессионального образования России

Показатели
Классификационный признак № 1. Организационная форма
Классификационные группы: 1.1 Структурное подразделение УПО, расширившее свои функции. 1.2. Новые структурные подразделения УПО по проблемам занятости ВУПО. 1.3. Относительно независимые от УПО организационные структуры по содействию занятости ВУПО. 1.4. Формы объединения без создания специальных структурных подразделений УПО. 1.5. В рамках общественных или самоорганизующихся форм. 1.6. В виде элемента информационно-виртуальной системы
Классификационный признак № 2. Уровень организации деятельности служб
Классификационные группы*:* 2.1. Организационная структура УПО. 2.2. Межвузовская структура. 2.3. Региональная структура. 2.4. Межрегиональная структура. 2.5. Межведомственная структура. 2.6. Структура с элементами организации деятельности на международном уровне
Классификационный признак № 3. Источник финансирования деятельности
Классификационные группы: 3.1. Бюджетное финансирование. 3.2.Внебюджетное финансирование. 3.3. Самофинансирование. 3.4. Дополнительные источники финансирования. 3.5. Волонтерские принципы финансирования
Классификационный признак № 4. Степень развития кооперации и координации деятельности
Классификационные группы: 4.1. С внутренней кооперацией и координацией деятельности. 4.2. Осуществляющие кооперацию и координацию в рамках ведомственного подхода. 4.3. Осуществляющие межведомственную направленность кооперации и координации деятельности
Классификационный признак № 5. Степень активизации инициатив обмена опытом работы
Классификационные группы: 5.1. Обмен опытом в рамках УПО. 5.2. Межвузовский обмен опытом. 5.3. Региональный (межрегиональный) обмен опытом. 5.4. Международный обмен опытом
Классификационный признак № 6. Уровень и формы информационного обеспечения
Классификационные группы: 6.1. Создающие «банк» абитуриентов. 6.2. Создающие «банк» студентов, выпускников. 6.3. Создающие «банк» вакансий для студентов, выпускников. 6.4. Организующие мониторинг спроса и предложения на рынке труда. 6.5. Создающие все виды банков (абитуриентов, студентов, выпускников, вакансий). 6.6. С различными формами информационного обеспечения
Классификационный признак № 7. Направления и формы деятельности
Классификационные группы: 7.1. С преобладанием маркетинговой составляющей в формах и направлениях деятельности. 7.2. Реализация технологий повышения конкурентоспособности ВУПО. 7.3. Реализующие систему активного «продвижения продукта» УПО (выпускника) на рынке труда

Дополнительная классификация служб маркетинга по второму признаку «уровень организации деятельности» позволила выделить следующие классификационные группы:

– 2.1 – службы маркетинга, действующие на уровне факультета. В некоторых крупных УПО (МГУ им. М. В. Ломоносова) службы маркетинга работают на каждом факультете;

– 2.2 – службы маркетинга, действующие на уровне представительств и филиалов УПО. Необходимость создания таких служб вызвана фактором удаленности от головного УПО и как следствие сложностью реализации функций маркетинга и контроля;

– 2.3 – службы маркетинга, действующие на уровне УПО. Службы, данной классификационной группы являются в большинстве своем преобладающими (маркетинг-центр Вологодского кооперативного техникума, и др.).

По третьему классификационному признаку (в ранее разработанной классификации это был седьмой признак) нами были выделены дополнительно следующие службы:

– 3.1 – службы маркетинга, ориентированные на РУПО. В деятельности данных служб отсутствует учет запросов РТ, все направлено лишь на потребителя образовательных программ, что порождает диспропорции в функционировании РУПО и РТ. Среди этих служб можно выделить еще две классификационные подгруппы:

3.1.1 – службы, ориентированные на внутреннюю среду маркетинга УПО – повышение квалификации персонала, преподавателей, инновационная деятельность, мониторинг качества образования, выявление удовлетворенности потребителей программ профессионального обучения (ППО), кадровый маркетинг, оценка профессиональной компетенции студентов, повышение конкурентоспособности студентов последних курсов (отдел обеспечения качества Сибирского государственного технологического университета);

3.1.2 – службы, ориентированные на внешнюю среду окружения УПО. Деятельность таких служб маркетинга УПО ориентируется на потребителей ППО посредством социологических исследований, профессиональной ориентации, совершенствования рекламной политики и политики PR и т. д. Деятельность таких служб позволяет увязать внешнюю и внутреннюю стратегию развития УПО с учетом региональных особенностей на РУПО;

– 3.2 – службы маркетинга, ориентированные на РУПО с элементами установления связей с РТ. В зависимости от широты реализации этих элементов в этой группе также можно выделить несколько подгрупп:

3.2.1 – службы, использующие стандартный набор инструментов взаимодействия с РТ – предоставление информации об имеющихся вакансиях, ведение базы данных предприятий-работодателей, участие в специализированных выставках, ярмарках и конференциях, осуществление целевой подготовки (отдел маркетинга Казанского государственного финансово-экономического института) [3];

3.2.2 – службы, использующие нестандартный подход к установлению связей с РТ. В свою очередь среди них, с учетом различных механизмов маркетинговой деятельности на РТ, можно выделить службы, использующие механизм социального партнерства (служба маркетинга Самарского государственного технического университета) [4]; службы, ориентированные на механизм совершенствования товарной политики в соответствии с требованиями РТ (отдел маркетинга Хабаровского торгово-экономического техникума) [5]; службы, ориентированные на изучения и решение проблем адаптации выпускников УПО на РТ (отдел практик маркетинга и трудоустройства Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна) [3]; службы, ориентированные на установления связей с выпускниками УПО в целях формирования благоприятного имиджа (создание профессиональной сети из добившихся успеха выпускников для поддержания устойчивого и привлекательного имиджа, приоритеты в таких службах отдаются не столько помощи выпускникам в адаптации к труду, сколько формированию имиджа УПО посредством успешных выпускников);

– 3.3 – службы маркетинга, ориентированные на процессы взаимодействия РУПО и РТ. Службы с активной позицией в социальном партнерстве с предприятиями-работодателями налаживают реальные связи с потребителями «конечного продукта УПО» – выпускника, при этом численность таких потребителей велика, а спектр взаимодействия с ними достаточно широк (работодатели принимают непосредственное участие в учебном процессе, материально-техническом обеспечении, инновационной деятельности УПО, высок процент целевой подготовки студентов и т. д.). Отдел маркетинга и развития Кубанского государственного технологического университета демонстрирует тесное сотрудничество с предприятиями-работодателями (Краснодар, Санкт-Петербург, Москва, Тюменская область и др.), что позволяет трудоустроить 99 % выпускников [3].

Анализ опыта деятельности маркетинговых служб УПО, в том числе и по направлению содействия занятости выпускников свидетельствует о разной степени открытости информации, представленной соответствующими информационными сайтами. На наш взгляд, неполнота информации препятствует эффективному процессу взаимодействия УПО с РУПО, РТ и снижает результативность процесса содействия занятости выпускников со стороны соответствующих служб. Поэтому считаем целесообразным выделение такого классификационного признака (четвертого по дополнительной классификации) как «доступность информации о маркетинговой деятельности УПО». По этому признаку можно выделить следующие классификационные группы:

– 4.1 – закрытые службы маркетинга (отдел по работе с абитуриентами, организации практик и трудоустройству выпускников Вологодского филиала Российского государственного торгово-экономического университета);

– 4.2 – открытые частично службы (Центр трудоустройства и маркетинга образовательных услуг Кемеровского государственного университета);

– 4.3 – открытые службы (Центр маркетинга и информационного менеджмента Российского государственного гуманитарного университета).

Процесс содействия трудоустройству выпускников УПО, в том числе и через механизм маркетингового взаимодействия РУПО и РТ, может различаться по его стадиям («вход» будущего выпускника в процесс профессиональной подготовки; процесс формирования профессиональных качеств, компетенций будущего выпускника; «выход» конечного продукта УПО – выпускника на РТ). Службы УПО, осуществляющие маркетинговую деятельность, могут подключаться к процессу содействия занятости выпускников на различных стадиях. Считаем необходимым дальнейшую дифференциацию служб маркетинга по классификационному показателю стадии осуществления комплексной маркетинговой деятельности по содействию занятости выпускников (5 признак по дополнительной классификации):

– 5.1 – служба маркетинга, не ставящая цель содействия занятости выпускника на любой стадии формирования его статуса. Есть УПО, которые практически не занимаются содействием занятости своих выпускников, выдавая документы об образовании без всякого содействия их трудоустройству. В этом случае маркетинговые службы выполняют только функции исследований РУПО и продвижение своих образовательных услуг, что в дальнейшем вызывает усиление диспропорций в спросе и предложении на РТ;

– 5.2 – служба маркетинга, осуществляющая содействие занятости выпускника на стадии окончания УПО. Большинство служб маркетинга со стандартным подходом к взаимодействию с РТ содействуют занятости будущих выпускников в основном на последних курсах их обучения, проводя опросы работодателей, студентов, презентации, консультации выпускников;

– 5.3 – служба маркетинга, осуществляющая процесс содействия занятости выпускника, начиная со стадии формирования его профессиональных качеств, компетенций. Включение службы маркетинга УПО в процесс содействия занятости выпускников еще на стадии профессиональной подготовки значительно повышает его эффективность. Помимо корректировки профессиональной подготовки с учетом запросов РТ, появляется возможность выявления существующих проблем адаптации студентов к трудовой сфере, позволяющая своевременно их решать;

– 5.4 – служба маркетинга, осуществляющая процесс содействия занятости выпускника, начиная со стадии «входа» в процесс профессиональной подготовки. Работодатели, использующие эффективные системы развития персонала начинают этот процесс с ранних стадий формирования субъекта труда. Службы маркетинга УПО могут устанавливать с ними взаимовыгодные контакты, осуществляя профориентационную деятельность среди потенциальных абитуриентов с учетом интересов работодателей. В свою очередь, это дает возможность УПО дальнейшего активного вовлечения работодателя в процесс отбора абитуриентов; формирования компетенций, нужных для работодателя профессиональных качеств потенциального выпускника; овладения потенциальным выпускником практическими навыками работы (практические занятия в филиалах кафедр на предприятии, привлечение к процессу обучения высококвалифицированных специалистов-практиков, практики и стажировки); выполнения студентами научных, курсовых, дипломных работ по заказу работодателя; целевой подготовки специалиста; участия в процессе адаптации молодого специалиста в трудовой среде, в том числе и в форме дополнительной занятости на предприятии в процессе обучения.

Таким образом, дальнейшее развитие методологических основ содействия занятости выпускников УПО в форме классификации позволило расширить ее с позиций нового опыта деятельности служб посредством более полного применения третьего критерия отбора служб представленной классификации – «связь с формированием и развитием маркетинговой деятельности УПО». В результате чего, по ранее имевшимся признакам классификации служб были дополнительно выделены новые классификационные группы служб: «организационная форма» (2 группы), «направления и формы деятельности» (3 группы), «уровень организации деятельности» (3 группы). Кроме того, классификация служб была дополнена новыми признаками с отнесением к ним классификационных групп: по признаку «доступность информации о маркетинговой деятельности УПО» – 3 группы; по признаку «стадии осуществления комплексной маркетинговой деятельности по содействию занятости выпускников» – 4 группы. Проведенная модификация классификации служб содействия занятости выпускников УПО позволяет более детально изучать их деятельность посредством нового подхода и способствует формированию методологических основ взаимодействия УПО с рынками услуг профессионального образования и труда в регионе.

Библиографические ссылки

1. О ситуации с трудоустройством выпускников образовательных учреждений профессионального образования всех уровней [Электронный ресурс]. URL: http://www.career-st.ru/career_cruising/lib/92.

2. Концепция формирования и функционирования системы содействия трудоустройству выпускников учреждений профессионального образования [Электронный ресурс] / Министерство образования и науки

РФ ; Федеральное агентство по образованию. 30.10.09. URL: kcst.bmstu.ru/about/concept.

3. Энциклопедия содействия трудоустройству : в 3 т. Т. 2. Мониторинг деятельности центров содействия занятости учащейся молодежи в системе высшего профессионального образования Российской Федерации / под ред. Е. П. Илясов. М. : ООО «РИТМ», 2005.

4. Фавстов Ю. К., Эйзипс М. А., Калинин В. Г. Интеграция образования и производства // Высшее образование сегодня. 2007. № 5. С. 11–13.

5. Корсаков В. В. Социальное партнерство: аспекты взаимодействия предприятий и учреждения СПО в деле подготовки специалистов // Среднее профессиональное образование. 2007. № 5. С. 23–25.

E. E. Lobanova

CLASSIFICATION OF EMPLOYMENT SERVICES OF ESTABLISMENTS OF VOCATIONAL TRAINING AS AN ELEMENT OF METODOLOGICAL BASES OF INTERACTION OF THE MARKET OF SERVICES OF VOCATIONAL TRAINING AND LABOUR MARKET

In the article the author proves the urgency of assistance in employment of graduates of vocational training establishments. Classification of services which carry out this process and basic elements are presented.

Keywords: vocational training establishment, employment, graduate, service.

© Лобанова Е. Э., 2011

УДК 068.11

С. А. Максимов, О. С. Станишевская

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ НА ВЕЛИЧИНУ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЛИНГА ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

Определены сферы возникновения синергии и предложены методы оценки синергетического эффекта в рамках решения задачи формирования системы контроллинговых показателей деятельности предприятия с целью оценки влияния выделенных типов реструктуризации на инновационный потенциал предприятий РКП.

Ключевые слова: контроллинг, инновационное развитие, синергетический эффект, реструктуризация предприятий.

Необходимость осуществления контроллинга инновационной деятельности на стратегическом и оперативном уровнях актуализирует проблему создания системы показателей, обеспечивающих согласование выделенных уровней управления. Ведущими среди них являются показатели, характеризующие уровень инновационного потенциала, величина которого зависит от множества факторов [1; 2].

Происходящие в настоящее время процессы реструктуризации оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и, в частности предприятий ракетно-космической промышленности (РКП), направлены на сохранение и повышение эффективности использования их экономического потенциала. Эффективная реструктуризация выступает важнейшим инструментом мобилизации ограниченных ресурсов и возможностей с целью обеспечения устойчивого инновационного развития предприятий ОПК, а также решения задач по обеспечению обороноспособности страны. Таким образом, решение проблемы оценки влияния реструктуризации на инновационный потенциал предприятия невозможно без решения проблемы оценки эффективности реструктуризации.

Выявленные особенности объекта исследования позволяют сформулировать ряд требований, которые необходимо учесть при оценке эффективности реструктуризации предприятий РКП [3]:

– учет нормативной обязательности выполнения государственного заказа по производству продукции оборонного назначения;

– учет неопределенности, связанной с реформой ОПК;

– учет инновационных технологий, которыми обладает ОПК, и возможности конверсии. Инновационность, в свою очередь, требует учета неопределенности, связанной с разработкой и внедрением технологий в «гражданскую» промышленность;

– учет синергетического эффекта, который может возникать как в связи с образованием интегрированной компании, так и в связи с вхождением в холдинг или выделением нового бизнеса;

*Работа подготовлена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

– распределение государственного заказа на конкурсной основе;

– возможность выхода на новые рынки в рамках конверсии.

Синергия рассматривается, в том числе, в следующем аспекте: в рамках оборонно-промышленного предприятия создается конверсионное производство, в которое привлекаются капиталы частных инвесторов с целью формирования интегрированной корпоративной структуры. При этом организационные и функциональные связи между оборонно-промышленным предприятием и конверсионным бизнесом остаются. Инновации из ОПК передаются в создаваемый бизнес, который развивается за счет средств частных инвесторов, в том числе развиваются и совершенствуются технологии, которые в связи с наличием связи между оборонно-промышленным предприятием и создаваемым производством, передаются первому, повышая тем самым его инновационность и, соответственно, способствуя получению государственного заказа на конкурсной основе. Таким образом, через конверсионные производства ОПК получает более высокий уровень разработок, в том числе, благодаря частным инвесторам [3].

Было проведено исследование определений и содержания понятия «реструктуризация», представленное различными авторами. Все авторы, к сожалению, не учитывают такую важную составляющую реструктуризации как изменение набора и характера связей, определяющих отношения между элементами экономической системы, т. е. синергетического эффекта. Именно он в значительной степени влияет на эффективность экономической системы, что является принципиально важным при определении архитектуры интегрированных корпоративных структур, создаваемых в РКП.

Таким образом, подводя итог вышесказанному, под реструктуризацией предприятия предлагается понимать целенаправленное изменение состава элементов хозяйственной системы и связей между ними, а также силы и характера связей целью обеспечения роста экономического потенциала и повышения эффективности функционирования и развития хозяйственной системы в изменившихся внешних и внутренних условиях за счет формирования новых свойств системы.

Такое изменение условий происходит за счет формирования новых свойств системы, зависящих от наличия и характера связей, определяющих отношения между элементами экономической системы, на основе максимизации стоимости бизнеса.

Итак, в качестве объекта реструктуризации предприятия предлагается понимать элементы и связи между ними. Выделенная цель реструктуризации – повышение эффективности, причем как функционирования, так и развития предприятия. В качестве критерия повышения эффективности предлагается применять максимизацию стоимости бизнеса, которая обеспечивается, в том числе, за счет синергетического эффекта. При этом, движущими силами проведения реструктуризации могут быть изменившиеся как внутренние, так и внешние условия.

В рамках проводимого исследования были выявлены факторы, отражающие специфику ОПК в целом и РКП, в частности. Специфика заключается, в первую очередь, в следующем: большинство предприятий РКП на современном этапе являются государственными; осуществление реструктуризации вызвано необходимостью диффузии инноваций в экономику (развитие конверсии) и повышения инновационного потенциала самих предприятий; важнейшим условием реализации инновационной стратегии развития является необходимость повышения инвестиционной привлекательности предприятий РКП.

Выявленные и систематизированные в рамках проведенного исследования факторы, подлежащие учету, касаются всех сфер деятельности хозяйствующего субъекта и представлены следующими основными группами: производство, материально-техническое снабжение, маркетинг, кадры, непрофильные и вспомогательные направления деятельности (инфраструктура), финансы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИОКР), управление.

Систематизация выделенных факторов была осуществлена с привлечением экспертов, имеющих непосредственное отношение к проблемам реструктуризации предприятий РКП. Систематизация была произведена по таким параметрам как источник влияния (внешний, внутренний), подверженность регулированию (регулируемый, нерегулируемый), характер информации (детерминированный, стохастический), значимость фактора.

Результаты систематизации факторов свидетельствуют о неоднородности мнений экспертов в отношении значимости отдельных факторов при оценке эффективности реструктуризации. Так, по результатам проведенного анализа произведено разделение факторов по признаку «значимость» на три группы, каждая из которых представлена совокупностью факторов, проранжированных в порядке значимости.

Неоднородность мнений экспертов в отношении признака «значимость» позволила сделать вывод о необходимости декомпозиции возможных вариантов проведения реструктуризации предприятий РКП и разработки соответствующей типологии.

Кроме того, проведенная систематизация факторов продемонстрировала необходимость учета неопределенности при оценке эффективности реструктуризации предприятий РКП.

В ходе исследования были выделены типы реструктуризации предприятий РКП с учетом взаимодействия реструктуризируемого предприятия и создаваемого на его основе бизнеса по признакам: производственно-технологические связи, управление, степень новизны, объем инвестиций.

Каждый из выделенных в работе факторов, определяющих эффективность реструктуризации пред-

приятий РКП, имеет различную значимость для разных типов реструктуризации. Это связано, в первую очередь, с особенностями каждого из выделенных типов реструктуризации и определяется характером связей между реструктуризируемым предприятием и создаваемым в процессе реструктуризации бизнесом, характеристикой продукта, производимого создаваемым бизнесом, а также схемой управления, степенью новизны и требуемым объемом инвестиций.

Таким образом, построенная типология реструктуризации предприятий РКП предполагает различный характер связей между реструктуризируемым предприятием и создаваемым бизнесом. Выявленные различия свидетельствуют о необходимости их учета при оценке синергетического эффекта в случае проведения оценки эффективности реструктуризации предприятий РКП. При этом, в случае наличия внешнего инвестора, осуществляющего вложения в создаваемый на базе предприятия РКП бизнес, необходимо учитывать синергетический эффект, возникающий между инвестором и создаваемым бизнесом.

В ходе исследования были выделены следующие основные сферы возникновения синергии, которые необходимо учитывать при проведении оценки бизнеса компании в условиях реструктуризации предприятий РКП и создания нового бизнеса: рынок и система сбыта, производство, продукты, научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИОКР), инфраструктура, материально-техническое снабжение (МТС), кадры, управление, финансы.

При этом формы проявления синергетического эффекта различны для выявленных типов реструктуризации. В табл. 1 представлены различия в проявлении эффекта синергии для выделенных типов реструктуризации по сферам возникновения синергии.

Наиболее существенно эффект синергии между реструктуризируемым предприятием РКП и создаваемым бизнесом проявляется для первого типа реструктуризации, что связано с наличием тесных связей. Для второго типа реструктуризации синергетический эффект менее выражен.

Третий из выделенных типов реструктуризации не предполагает наличие значительного синергетического эффекта, так как создаваемый бизнес является самостоятельной единицей хозяйствования с отсутствием конструкторских или технологических связей с реструктуризируемым предприятием, собственным управлением и собственной финансовой системой.

Однако по некоторым объектам синергии требуется учет синергетического эффекта и для третьего типа реструктуризации РКП при проведении оценки ее эффективности. Кроме того, для третьего типа реструктуризации возможно проявление значительного синергетического эффекта между создаваемым бизнесом и внешним инвестором, в случае его наличия.

Выделенные сферы возникновения синергии требуют определения источника синергии и, соответственно, методов оценки возникающей синергии. Для учета синергии при проведении оценки эффективности реструктуризации предприятий РКП предлагается применение методов, отраженных в табл. 2.

Для всех трех типов реструктуризации по сферам возникновения синергии (если они присутствуют) «производство», «НИОКР», «инфраструктура», «МТС», «кадры» и «управление» для оценки синергетического эффекта используются традиционные методы планирования и прогнозирования денежных потоков. Для трех других выделенных сфер возникновения синергии необходимо приенение самостоятельных инструментов оценки с целью последующего учета данного эффекта при оценке эффективности реструктуризации предприятий РКП [2; 4].

Проведенные анализ и систематизация факторов, определяющих эффективность реструктуризации предприятий РКП, продемонстрировали необходимость учета рисков, связанных с реализацией реструктуризации и созданием новых бизнесов на основе базового реструктуризируемого предприятия.

Оценка влияния реструктуризации предприятий РКП на величину инновационного потенциала представляет собой многостадийную задачу, которую можно представить в виде методики, включающей следующую последовательность шагов:

1) выявление и систематизация факторов, определяющих эффективность реструктуризации предприятия РКП;

2) формирование допустимых альтернатив развития реструктуризируемого предприятия;

3) определение типа реструктуризации для бизнеса;

4) учет рисков создания бизнеса и определение ставки дисконтирования;

5) определение сфер возникновения синергии для бизнеса;

6) оценка эффекта синергии по выделенным сферам возникновения;

7) построение денежных потоков бизнеса;

8) оценка стоимости бизнеса;

9) выбор типа реструктуризации;

10) оценка влияния реструктуризации на величину инновационного потенциала предприятия.

Таким образом, учет синергетического эффекта, возникающего в результате реструктуризации, позволяет повысить эффективность инструментов контроллинга инновационного развития предприятий ОПК.

Библиографические ссылки

1. Ерыгин Ю. В., Ерыгина Л. В., Максимов С. А. Сбалансированная система показателей – инструмент контроллинга инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности // Вестник СибГАУ. Вып. 1 (33). 2011. С. 167–169.

2. Ерыгина Л. В., Максимов С. А. Инструменты контроллинга инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : сб. науч. тр. науч.-технич.

конф. молодых специалистов / ОАО «ИСС» ; под ред. Н. А. Тестоедова. Железногорск : Изд-во ОАО «ИСС». 2011. С. 362–363.

3. Ерыгина Л. В., Беляков Г. П. Теоретические положения и инструменты оценки влияния процессов реструктуризации на инновационный потенциал предприятий РКП // Вестник СибГАУ. Вып. 2 (23). 2009. С. 190–196.

4. Ерыгина Л. В., Максимов С. А. Сбалансированная система показателей как инструмент контроллинга инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии : сб. науч. тр. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. / Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2011. С. 350–352.

Таблица 1

Формы проявления эффекта синергии для типов реструктуризации

Сфера возникновения	Форма проявления эффекта синергии		
	Тип I	Тип II	Тип III
Рынок и система сбыта	рост объема продаж и цены продукта за счет использования бренда		
	экономия затрат в связи с использованием существующей рыночной инфраструктуры; рост объема продаж в связи с выходом на новые рынки		
Производство	рост фондоотдачи в связи с использованием и дозагрузкой существующего оборудования; экономия затрат в связи с использованием существующей инфраструктуры основного и вспомогательных производств	аналогично типу I, однако наличие рисков неполучения выгод в части экономии затрат и роста фондоотдачи при возникновении более привлекательных коммерческих альтернатив	аналогично типу II, однако более высокий риск неполучения выгод в части экономии затрат и роста фондоотдачи при возникновении более привлекательных коммерческих альтернатив
Продукты	рост объемов выручки за счет реализации модифицированного продукта, производимого на базе существующего	рост объемов выручки за счет реализации технологически однородного продукта, производимого на базе существующего	максимизация доходности за счет диверсификации – менее значительное влияние эффекта диверсификации в сравнении с I и II типами
	минимизация риска за счет диверсификации		
НИОКР	экономия на затратах, связанных с осуществлением НИР и ОКР, приобретением лицензий, ноу-хау и пр.	аналогично типу I, однако наличие рисков неполучения выгод в части экономии на затратах	преимущественно отсутствует
Инфраструктура	экономия затрат в связи с использованием существующей инфраструктуры		
МТС	экономия затрат в связи с использованием и дозагрузкой существующих складских помещений	аналогично типу I, однако наличие рисков неполучения выгод в части экономии затрат	аналогично типу II, однако более высокий риск неполучения выгод в части экономии затрат
Кадры	рост производительности труда всех работников в связи с дозагрузкой – сокращение издержек – эффект масштаба	аналогично типу I, однако наличие рисков неполучения выгод в части сокращения издержек	аналогично типу II, однако более высокий риск неполучения выгод в части сокращения издержек
Управление	экономия на затратах, связанных с содержанием управленческого персонала, а также внедрением и эксплуатацией систем планирования, учета и отчетности	экономия на затратах, связанных с внедрением и эксплуатацией систем планирования, учета и отчетности	преимущественно отсутствует
Финансы	рост потенциального объема заимствований за счет увеличения доходов; экономия на плате за риск в процентной ставке кредита; экономия на затратах, связанных с выплатой процентов по кредитам в связи со снижением потребности в кредитовании, а также снижением ставки		вероятность возникновения экономии на процентах по кредиту, транзакционных издержках, а также выплатах дивидендов достаточно низкая
	снижение процентных выплат по кредиту; экономия на транзакционных издержках, связанных с дополнительными эмиссиями акций в связи с сокращением потребности в эмиссиях; низкий уровень дивидендных выплат		

Таблица 2

Сферы возникновения синергии и методы оценки синергетического эффекта

Сфера возникновения синергии	Источники синергии	Методы оценки синергии
Рынок и система сбыта	Снижение издержек за счет эффекта масштаба. Повышение конкурентоспособности (goodwill)	Методы оценки goodwill. Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
Производство	Снижение издержек за счет повышения загрузки производственных мощностей	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
Продукты	Эффект диверсификации	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков. Методы формирования портфеля продуктов
НИОКР	Снижение издержек за счет исключения дублирующих функций и процессов	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
Инфраструктура	Снижение издержек за счет исключения дублирующих функций и процессов	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
МТС	Снижение издержек за счет эффекта масштаба	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
Кадры	Снижение издержек за счет повышения загрузки персонала	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков
Финансы	Перекрестное финансирование	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков. Оптимизация структуры капитала
Управление	Сокращение издержек на содержание управленческого персонала, а также систем планирования, учета и отчетности	Методы планирования и прогнозирования денежных потоков

S. A. Maksimov, O. S. Stanishevskaya

ESTIMATION OF INFLUENCE OF RESTRUCTING ON SIZE OF INNOVATIVE POTENTIAL IN SYSTEM OF CONTROLLING OF THE SPACE-ROCKET INDUSTRY ENTERPRISES

In clause spheres of occurrence of a synergy are certain and methods of an estimation synergetic effect within the limits of the decision of a problem of formation of scorecard of controlling with the purpose of an estimation of influence of the allocated types of restructing on innovative potential of the space-rocket industry enterprises are offered.

Keywords: controlling, innovative development, synergetic effect, enterprise restructing.

© Максимов С. А., Станишевская О. С., 2011

УДК 332.012.23

Е. П. Севастьянова

НЕОКЛАССИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА И ПРИЧИНЫ СОВРЕМЕННОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИЗИСА*

Проведено сравнение постулатов неоклассической парадигмы и модели Кейнса с современным капитализмом. Показано, что неоклассическая парадигма, лежащая в основе экономической структуры большинства государств, неадекватна самой сути рыночной экономики. Современный мировой экономический кризис и в странах с развитой и развивающейся рыночной экономикой имеет одну основу – экономические структуры этих стран, каждая по-своему, проигнорировали необходимость систематического государственного регулирования из-за того, что строились на базе неоклассической парадигмы. Модель Кейнса, которая никогда реально не воплощалась в жизнь, может стать основой для обновленной целостной, стабильной и устойчивой экономической структуры, именуемой «новым капитализмом».

Ключевые слова: экономический кризис, неоклассическая парадигма, модель Кейнса.

Постановка проблемы. В 1990-е гг., когда в США рост экономики и благосостояния шёл непрерывно 120 месяцев, многие экономисты заговорили о преодолении цикличности экономического развития, о том, что экономическая депрессия – это пережиток прошлого. Наверное, эти разговоры продолжались бы до сих пор, если бы небеспрецедентный по своим масштабам после второй мировой войны финансовый кризис 2007–2008 гг., вылившийся в текущий мировой экономический кризис.

* Исследование осуществлено при финансовой поддержке DAAD, реферат № 325.

Этот кризис стал сигналом к изменению структуры экономической системы. И начать нужно с парадигмы, лежащей в основе этой структуры.

Неоклассическая парадигма используется и сейчас при построении экономической политики выхода из кризиса. Но простое манипулирование фискальными и монетарными инструментами не может устранить глубинных причин кризиса, являющегося продуктом противоречий в экономической системе. Устранение этих противоречий требует систематического государственного регулирования, чего не допускает неоклассическая парадигма.

Целью данного исследования является доказательство выдвинутого выше тезиса о глубинной причине современного кризиса и обоснование того, что модель Кейнса способна стать основой для новой более устойчивой экономической системы, именуемой «новым капитализмом». Для достижения данной цели были изучены постулаты и допущения, положенные в основу неоклассической и кейнсианской моделей и проведено их сравнение с современным капитализмом.

Основными постулатами, различия в которых приводят к диаметрально противоположным взглядам на государственное регулирование рыночной экономики, являются отношение к неопределенности будущего, роль денег в экономике, мнение о врожденной стабильности/нестабильности экономической системы.

Фундаментальная неопределенность. Основополагающей концепцией модели Кейнса является фундаментальная неопределенность будущего, означающая неспособность людей предсказывать будущее даже посредством теории вероятности, так как существенная часть необходимой информации еще не создана.

Неоклассики уподобляют фундаментальную неопределенность будущего неясности, при которой создана недостающая информация, а проблема – лишь в существенных издержках ее обнаружения. Так, исследуемые представителями австрийской ветви классической школы (Визер, Бём-Баверк, Хайек и др.) способы и возможности предсказывания будущего касались не фундаментальной неопределенности, а неясности. Таким образом, неоклассики уподобляют современную хозяйственную систему примитивному хозяйству, так как фундаментальная неопределенность – свойство сложной экономической системы, которое общество приобрело в процессе эволюции.

Сложная экономическая система имеет две отличительные особенности от примитивной [1]:

1) в производстве применяются активы длительного пользования (поэтому будущее связано с настоящим и определяется решениями, принимаемыми в настоящем времени);

2) высокий уровень разделения труда в обществе, из-за чего люди тесно взаимосвязаны и каждый зависит от решений других.

Современная рыночная экономика обладает этими свойствами, следовательно, она является сложным хозяйством, обладающим фундаментальной неопределенностью. Уже здесь, в самой основе неоклассическая парадигма не соответствует современному капитализму. Уподобляя современную рыночную экономику примитивному хозяйству, неоклассическая парадигма упускает важные взаимосвязи и принципы функционирования системы.

Роль денег в экономике. Одним из таких принципов является роль денег в экономической системе – следующее фундаментальное отличие модели Кейнса от неоклассической парадигмы. Неоклассики полагают, что принципы функционирования капиталистической системы хорошо описываются моделью бартерной экономики. В ней агенты владеют определенным количеством ресурсов, и рыночный обмен позволяет им улучшить свое положение, получая желаемые товары. В модель можно добавить деньги, однако это не изменит выводов о принципах функционирования экономики: «до момента возникновения асимметрии информации…финансовая система не важна» [2]. Будущее известно, по крайней мере, в том смысле, что все случайности правильно оценены и учтены в принятых решениях о сделках. И все идет, как и должно идти (как и учтено), кроме случаев экзогенных шоков. Но даже в этом случае любой экономический агент может немедленно отменить решение/сделку [3].

Кейнс назвал подобную систему «экономикой реального обмена» [4] и утверждал, что она неадекватна капиталистической системе. Капитализм является денежной экономикой. Действительно, в современных экономических системах и с развитой, и с развивающейся рыночной экономикой товары необходимо произвести до того, как их можно будет обменять, поэтому производство нужно финансировать, и если финансирование осуществлено, это действие (решение) является необратимым. Поэтому, во-первых, существует мотив накопления денег, во-вторых, ведущим принципом производственной деятельности является мотив получения прибыли, т. е. при принятии решений рассматриваются денежные цели. Следовательно, как и утверждал Кейнс, и это положено в основу его модели: «деньги играют свою собственную уникальную роль, и влияют на мотивы и решения» [4, с. 408].

Все это резко контрастирует с бартерной системой, не учитывающей самостоятельную роль денег, которые должны быть поставлены в центр теоретической модели, анализирующей рыночную экономику. Причем центральная роль денег и финансовой системы основана не на асимметрии информации, а на природе капиталистической экономики. Необходимо отметить, что эти финансовые аспекты, лежащие в основе кейнсианского анализа, были упущены «кейнсианством» середины XX в. [5], явившегося основой экономической политики, проводимой в 1950–60-е годы в развитых странах. В 1970-х годах после серии кризисов файн-тьюнинг был отвергнут, так как эта политика привела к усилению неравенства, инфляции и длительной безработицы. Тогда же были отвергнуты идеи Кейнса, которые неверно ассоциировали с псевдокейнсианством.

Врожденная нестабильность рыночной системы. В результате предыдущих двух фундаментальных различий, неоклассическая парадигма и кейнсианская модель расходятся и в отношении к тому, что внутренне присуще капитализму: стабильность или нестабильность.

В экономике реального обмена в условиях совершенной конкуренции рыночные силы помогают стабилизировать экономическую систему, сами они нестабильности не вызывают тем более. Последняя может быть вызвана только экзогенными факторами, такими как государственное вмешательство или шоки. Государственное вмешательство вызывает нестабильность по двум причинам. Во-первых, из-за возможных ошибок и временных лагов, имеющих место в осуществлении экономической политики. Во-вторых, из-за влияния политических интересов на принимаемые решения в области экономической политики [6].

Идея неоклассиков о внутренне присущей капитализму стабильности нашла отражение в их взгляде на причины цикличности развития экономки, которыми могут быть только экзогенные шоки. Эндогенные процессы приводят только к экономическому равновесию. Текущий кризис продемонстрировал слабость этого утверждения, так как ни одна из предлагаемых причин не попадает в раздел экзогенных. Что касается государственного регулирования, то многие экономисты, бизнесмены и обозреватели говорят, наоборот, о его недостаточности.

Напротив, объяснения текущего кризиса, подпадающие под кейнсианскую модель цикличности развития экономики, превалируют. Кейнс утверждал, что нестабильность (и цикличность экономического развития) имеет эндогенные причины и внутренне присуща рыночной экономике. Пожалуй, наиболее цитируемой сейчас теорией цикличности развития экономики является гипотеза финансовой нестабильности Мински [7]. Согласно ей, структура капиталистической экономики накапливает хрупкость в фазу экономического подъема в результате эндогенных факторов. Чем дольше длится фаза экономического подъема, тем более оптимистичными становятся ожидания хозяйствующих субъектов, и тем большее побуждение к инвестированию проявляют фирмы. Повышается спрос на деньги, процентные ставки растут и становятся высокими. Банки и другие финансовые институты реагируют на это, не только увеличивая количество денег в обращении, но и предлагая их новые виды, чтобы выйти из-под ограничений Центрального банка, которые мешают им получить высокую прибыль в столь подходящий для этого период. В результате подобных финансовых инноваций и роста побуждения к инвестированию фирмы переходят на понци-финасирование, когда кредиты берутся для выплаты процентов по другим кредитам, т. е. фактически происходит рост мыльного пузыря. Из-за этого повышается финансовая хрупкость экономической системы и стимулируется рост цен. Так, рыночные механизмы сами генерируют нестабильность в фазу экономического подъема.

Хаймен Филлип Мински разрабатывал свою теорию, основываясь на кейнсианском взгляде на капитализм. Он утверждал, что идеи Кейнса были неверно интерпретированы и воплощены в середине XX в. в развитых странах.

Выводом исследования природы цикличности экономического развития явилось утверждение Мински о том, что капитализм является динамичной экономической системой, пронизанной противоречиями и взаимозависимостями, специфичными только для этой системы. Он утверждал, что «стабильность приводит к нестабильности», т. е. продолжительный экономический подъем приводит к накапливанию финансовой хрупкости системой, а цикличность присуща рыночной экономике «из-за финансовых атрибутов, играющих в капитализме существенную роль» [8]. Он отмечал, что рыночная экономика подвержена финансовой нестабильности, однако после второй мировой войны ее проявление сдерживалось массивным государственным вмешательством.

Утверждение Кейнса и вслед за ним Мински о противоречиях, свойственных рыночной экономике, справедливо по отношению к современному капитализму. Противоречивая природа рыночных механизмов отмечается многими экономистами и бизнесменами. Так, конкуренция способствует рациональному распределению ресурсов и экономическому росту, но в то же время приводит к приспособленчеству и ориентации на краткосрочные проекты [9]. Инновации приводят к созданию новых рынков, экономии ресурсов, но также изменяют структуру экономики, поведение и мотивы и, таким образом, дестабилизируют ее [10]. Банки, с одной стороны, генерируют стабильность, тщательно проверяя заемщиков, с другой – нестабильность, если теряют подобную тщательность в длительную фазу экспансии или в результате конкурентного давления, а также структурой своих балансов, на которую чутко реагируют биржи и рынок [11].

Таким образом, нестабильность действительно внутренне присуща современной форме капитализма.

Государственное вмешательство в рыночную экономику. Так как Кейнс и неоклассическая парадигма имеют во многом диаметрально противоположные взгляды на принципы функционирования рыночной экономики, их взгляды на государственное вмешательство тоже сильно различаются. В неоклассической парадигме государственное вмешательство допустимо только в случае провалов рынка, таких как неэластичность спроса или асимметрия информации. Причем, государственное вмешательство допустимо только в виде временных, краткосрочных целевых мер, направленных на компенсацию соответствующих провалов и возврата экономики на ее естественный путь развития. Государство ни в коем случае не должно пытаться изменить путь развития рыночной экономики. Такая политика краткосрочного файнтьюнинга дополняется долгосрочной политикой, на-

правленной на поддержание конкурентной среды, чтобы рыночные механизмы могли работать в полную силу. Таким образом, неоклассическая парадигма считает, что государственное вмешательство должно быть краткосрочным и ограниченным.

Напротив, в кейнсианской модели государство является необходимым дополнением частного сектора, основная цель которого – прибыль, так как рыночные механизмы в сложном рыночном хозяйстве сами по себе генерируют нестабильность, причем в фазу экономического подъема. Следовательно, согласно кейнсианской модели, государственное вмешательство должно осуществляться в течение всего экономического цикла, т. е. постоянно, чтобы не допускать роста финансовой хрупкости путем развития финансовых инноваций.

Так, незадолго до финансового кризиса 2007–2008 гг. в США появились новые финансовые инструменты – инновационные ипотечные контракты и формы обеспечения, позволяющие получать крупные кредиты на покупку домов домохозяйствам с низким доходом или очевидной неспособностью; по другой причине рассчитываться по принимаемым на себя обязательствам (90-летний старик получал кредит с рассрочкой платежа на 25–30 лет – при должном контроле со стороны государства такие «инновации» просто не были бы допущены). Но чтобы быть способным остановить раздувание мыльного пузыря, государственный сектор должен иметь большие масштабы, и государственное вмешательство должно быть систематическим. Однако с 1970-х годов XX столетия в мире возникла мода на неоклассическую парадигму. И вместо того, чтобы останавливать раздувание пузыря, на международном и национальном уровнях были приняты финансовые акты, ослабляющие контроль государства за финансовым сектором и снижающие требования обеспеченности кредитов. (The Basel Capital Adequacy Accord (1988), the Gramm-Leach-Bliley Act (1999)). Таким образом, следование в формировании экономической политики неоклассической парадигмы привело к столь масштабному финансовому кризису, переродившемуся в экономический.

Следовательно, современный капитализм и в развитой, и в развивающейся формах требует постоянного и масштабного государственного вмешательства.

Действительно, государственное вмешательство стабилизирует экономическую систему через денежные потоки и воздействие состояния госбюджета на деловую активность.

Наиболее распространенной моделью, отражающей прямое и непрямое воздействие госрасходов и налогов на частный сектор, является кейнсианский мультипликатор. Однако представляется, что в аспекте данного исследования более показательной в этом плане является функция дохода частного сектора, предложенная польским экономистом Михаилом Калецким. Согласно ей, совокупный доход сектора фирм в денежном выражении равен [12]:

$$\Pi = I - S_w + DEF + NX, \qquad (1)$$

где П – совокупный доход фирм, оставшийся после уплаты налогов; I – совокупные внутренние частные инвестиции; S_w – сбережения домохозяйств; DEF – дефицит госбюджета; NX – чистый экспорт.

В соответствии с уравнением (1) существует прямая взаимозависимость между совокупным доходом сектора фирм и его инвестиционными расходами. Действительно, совокупный доход сектора фирм определяется главным образом потоком инвестиций, которые в свою очередь зависят от ожиданий предпринимателей относительно прибыли. Эти ожидания зависят от размера текущей прибыли. Такая взаимозависимость в капиталистической экономике является ее уязвимой чертой. Фискальная политика государства позволяет нивелировать дестабилизирующий эффект этой взаимозависимости.

Еще одной возможностью государства стабилизировать экономику является сдерживание финансовых инноваций, приводящих к стагфляции и рецессии, путем их предотвращения или хотя бы недопущения получения с их помощью «быстрых» денег, что позволит охладить пыл изобретателей новых финансовых инструментов.

Стоит однако заметить, что государственное вмешательство имеет противоречивую природу в рыночной экономике. С одной стороны, оно стабилизирует экономику, с другой – может вызывать инфляцию и феномен «морального риска». Действительно, если неблагоприятные экономические события в жизни одной стороны (реальный и финансовый секторы) гарантированно компенсируются другой стороной (государством), то первая получает стимул быть менее осторожным и рисковать. Вдобавок конкуренция толкает частный сектор на попытки через инновации выйти из-под государственного контроля, создающего препятствия к получению прибыли. Однако все это в очередной раз доказывает, что государственное вмешательство должно быть постоянным и широкомасштабным. Иначе реакция государства на изменения в экономике, на финансовые «инновации» частного сектора неизбежно будет медленной, запоздалой, и государство будет неспособно компенсировать дестабилизирующее воздействие рыночных механизмов.

Поэтому результатом политики файн-тьюнинга, применявшейся в 1950–60-х годах XX в. стали рост несправедливости в распределении доходов, инфляция и длительная циклическая безработица, вылившиеся в ряд кризисов, а результатом применения неоклассической модели, также предусматривающей краткое и узкоцелевое государственное вмешательство, стало нарастание мыльного пузыря, явившегося причиной современного мирового экономического кризиса.

Новый капитализм. Многие экономисты высказываются за необходимость активизировать роль государства в рыночной экономике. Так, нобелевский лауреат Джозеф Стиглиц написал: «Финансовый кризис, „сделанный в США”, показал необходимость всеобщего и более жесткого контроля» [13]. А вот высказывание другого нобелевского лауреата Пола

Самуэльсона: «как мы увидели, нерегулируемые рынки могут сами себя похоронить» [14].

Более того, многие экономисты предлагают обратиться к идеям Кейнса. Так, нобелевский лауреат Пол Кругман написал: «… я также уверен, что Джон Мейнард Кейнс – экономист, понявший суть Великой депрессии, – сейчас актуален, как никогда» [15].

Однако нельзя путать идеи Кейнса с их неверным толкованием и воплощением в период эры «кейнсианства» в 1950-60-е годы, когда идеи Кейнса были сведены к файн-тьюнингу – краткосрочному государственному вмешательству в периоды экономической нестабильности. Напротив, кейнсианское видение рыночной экономики, чьи механизмы обладают структурными недостатками, предполагает прямое широкомасштабное и систематическое участие государства в экономической жизни посредством кооперации между частным и государственным сектором с помощью фискальных и монетарных мер.

Псевдокейнсианская модель файн-тьюнинга не решала структурных проблем рыночного механизма, а наоборот, усугубляла их. Так, результатом ее применения стали рост несправедливости в распределении доходов, инфляция, длительная циклическая безработица. После серии кризисов в 1970-х годах эта модель, а также неверно ассоциированная с ней модель Кейнса, были отвергнуты, и мир вернулся к неоклассической парадигме. Однако эта парадигма также продемонстрировала свою несостоятельность и привела к современному экономическому кризису. Если бы рост необеспеченного кредитования в развитых странах был замечен и остановлен ранее, кризиса бы не было, или он не имел бы таких масштабов.

К сожалению, момент перехода российской экономики с плановой модели на рыночную совпал с новой модой на дерегулирование. Не было создано условий для перехода, специальных институтов, экономисты и политики посчитали, что рыночные механизмы сделают все сами. И распахнутая для сильных, поддерживаемых своими государствами иностранных конкурентов российская экономика превратилась в сырьевой придаток, поскольку рыночные механизмы позакрывали все, не связанное с быстрой прибылью и «экономикой трубы». Так как в России на момент начала кризиса производство готовой продукции в промышленных масштабах практически не осуществлялось, не было у нее и запаса прочности.

Таким образом, возврат к неоклассической парадигме является глубинной причиной современного экономического кризиса, который сейчас нужно рассматривать не как зло, а как сигнал к смене господствующей парадигмы.

Неоклассическая парадигма в своих фундаментальных постулатах неадекватна современной рыночной экономике, уподобляя ее примитивному хозяйству, упуская тем самым из рассмотрения важнейшие взаимосвязи и приводя к неверным выводам, которые вылились в мировой экономический кризис. Модель Кейнса, напротив, продемонстрировала свою адекватность современной рыночной экономике и в своих постулатах и тем, что наиболее правдоподобно объясняет истоки кризиса, называет противоречия в современной экономической системе, которые привели к нему. Поэтому она может стать основой для новой, более стабильной экономической системы.

Библиографические ссылки

1. Keynes J. M. The General Theory of Employment, Interest and Money. N. Y. : Harcourt Brace, 1936. P. 210.

2. Gertler M. Financial Structure and Aggregate Economic Activity: An Overview // Journal of Money, Credit and Banking.1988. № 20 (3). Part 2. P. 581.

3. Mark D. Flood. An Introduction to Complete Markets. Review of Federal Reserve Bank of St. Louis. March/April. 1991.

4. Keynes J. M. A Monetary Theory of Production 1933 / ed. by D. Moggridge // in The Collected writings of John Maynard Keynes. Vol. XIII. London : Macmillan, 1973.

5. Patinkin D. Money, Interest, and Prices: An Integration of Monetary and Value Theory, Evanston: Row, Peterson, 1956 ; Modigliani F., Miller M. H. The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment // American Economic Review. 1958. Vol. 48(3). P. 261–297.

6. Freidman M. The Role of Monetary Policy // American Economic Review. 1968. Vol. 58 (1). P. 1–17 ; Kydland F. E., Prescott E. C. Rules Rather than Discretion: The Inconsistency of Optimal Plans // Journal of Political Economy. 1977. Vol. 85 (3). P. 473–492 ; Barro R. J., Gordon D. B. A Positive Theory of Monetary Policy in a Natural Rate Model // Journal of Political Economy. 1983. Vol. 91 (4). P. 589–610.

7. Chancellor E. Ponzi Nation // Institutional Investor. February 7th, 2007 ; Buttonwood: Ponzificating // The Economist. March 15th. 2007 ; Lahart J. In Time of Tumult, Obscure Economist Gains Currency: Mr. Minsky Long Argued Markets Were Crisis Prone ; His 'Moment' Has Arrived // the Wall Street Journal. August 18th. 2007 ; Magnus G. What This Minsky Moment Means // the Financial Times. August 22th. 2007 ; McCulley P. Global Central Bank Focus // The Plankton Theory Meets Minsky. Sydney : PIMCO, 2007.

8. Minsky H. P. Stabilizing an Unstable Economy. New Heaven : Yale University Press, 1986. P. 173.

9. Galbraith J. K. The Great Crash. 3rd edn. Cambridge, MA : The Riverside Press, 1961.

10. Lynda M. Applegate, Jumpstarting Innovation: Using Disruption to Your Advantage [Electronic resource]. Harvard : HBS Working Knowledge, 2007. URL: http://hbswk.hbs.edu/item/5636.html.

11. Wojnilover A. M. L'envoi", in Financial Crises: Institutions and Markets in a Fragile Environment / ed. by E. I. Altman, A. W. Sametz. N. Y. : Wiley, 1977. P. 234–237 ; Schinasi G. J. Safeguarding Financial Stability: Theory

and Practice. Washington, DC : International Monetary Fund, 2006 ; Morgenson G. A Road Not Taken by Lenders // New York Times. April 6th, 2008.

12. Kalecki M. The Determinants of Profits // in Selected Essays on the Dynamics of the Capitalist Economy / ed. by F. Kaboub. Cambridge : Cambridge University Press, 1971. P. 78–92.

13. Stiglitz Joseph E. Markets Can't Rule Themselves // Newsweek. December 31. 2008.

14. Samuelson Paul. On Economics Obama Would Be Wise To Steer a Middle Course // The Independent. January 19. 2009.

15. Krugman P. What to Do // The New York Review of Books, 2008. Vol. 55, № 20. December 18,

E. P. Sevastyanova

NEOCLASSICAL PARADIGM AND CAUSES OF THE MODERN ECONOMIC CRISIS

This paper compares the fundamental postulates of neoclassic paradigm and Keynesian model with the modern capitalism. It shows that neoclassic paradigm, which underlies economic structure of major countries, is inadequate to the essence of market economy. The research concludes that the current crisis in the countries with both advanced and developing market economy has happened because their economic structures, each on its own way, have ignored the requirement of the systematic government regulation due to basing on neoclassic paradigm. Keynes model, which in fact has never been implemented, may be a base for a revised holistic, stable, and robust economic structure – for a "new capitalism".

Keywords: economic crisis, neoclassical paradigm, Keynes model.

© Севастьянова Е. П., 2011

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абелян Акоп Сарибекович – кандидат экономических наук, доцент, декан дневного отделения Северо-Кавказского института бизнеса, инженерных и информационных технологий. Окончил Кубанский государственный технологический университет в 1987 г. Область научных интересов – модернизация в промышленности, бизнес-процессы, движение финансового капитала, институционализм. E-mail: abelyan26@mail.ru.

Агафонов Евгений Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1997 г. Область научных интересов – математическое моделирование, проектирование сложных систем, задачи идентификации и управления. E-mail: agafonov@gmx.de.

Агафонова Наталья Геннадьевна – аспирант Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. Окончила Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля в 2004 г. Область научных интересов – интеллектуальный потенциал: сущность, особенности воспроизводства. E-mail: agafonovang@gmail.com.

Алексеева Евгения Юрьевна – ассистент кафедры финансов и кредита Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 г. Область научных интересов – управление социальными инвестициями. E-mail: alexeeva_85@mail.ru.

Беляков Геннадий Павлович – доктор экономических наук, профессор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1966 г. Область научных интересов – экономика народного хозяйства. Т. 8(391)264-00-14.

Бойко Андрей Анатольевич – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский институт космической техники в 1990 г. Область научных интересов – управление основными производственными фондами машиностроительных предприятий. E-mail: boiko@sibsau.ru.

Бойко Оксана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1985 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, теория автоматического управления, композиционные материалы. E-mail: bouko@sibsau.ru.

Большаков Владимир Александрович – заведующий лабораторией научно-производственного центра «КПСМ-фильтр» НИИ экспериментальной медицины Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Окончил Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана в 1983 г. Область научных интересов – разработка проницаемых конструкций из комбинированных пористых сетчатых материалов и создание технологий их получения. E-mail: bolshakov-va@yandex.ru.

Бубнов Вячеслав Анатольевич – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой бухгалтерского учета и налогообложения Иркутского государственного университета путей сообщения. Окончил Иркутскую государственную экономическую академию в 1994 г. Область научных интересов – региональная экономика. E-mail: bubnov_v@irgups.ru.

Буров Андрей Ефимович – кандидат технических наук, научный сотрудник специального конструкторско-технологического бюро «Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский политехнический институт в 1987 г. Область научных интересов – моделирование деформирования и разрушение композиционных материалов, конструкционная прочность. E-mail: andrey@icm.krasn.ru.

Василенко Константин Николаевич – кандидат технических наук, начальник отдела телекоммуникаций ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика». Окончил Красноярский государственный технический университет в 2001 г. Область научных интересов – информационные технологии и телекоммуникации. E-mail: vkn@informika.ru.

Головин Михаил Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и экспериментальной механики машин политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский политехнический институт в 1968 г. Область научных интересов – машиностроение, приводы линейного перемещения. Т. 8(391)249-75-55.

Гопанчук Владимир Васильевич – ведущий конструктор ОКБ «Факел». Окончил Харьковский авиационный институт в 1984 г. Область научных интересов – разработка перспективных электроактивных двигателей. Т. 8(4012)55-66-62.

Гришко Яков Петрович – генеральный директор ОАО «ЭКА». Окончил Военный инженерный Краснознаменный институт имени А. Ф. Можайского в 1980 г. Область научных интересов – управление рисками и экономика в ракетно-космической технике. E-mail: eka@oaoeka.ru.

Еремеев Дмитрий Викторович – кандидат экономических наук, заместитель заведующего кафедрой финансов и кредита Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1996 г. Область научных интересов – инновации, экономика предприятия. E-mail: eremeev.dmitriy@gmail.ru.

Ереско Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений инженерно-строительного института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2000 г. Область научных интересов – инженерные и технические науки. E-mail: eral@mail.ru.

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, член-корреспондент Академии наук высшей школы РФ. Окончил Красноярский политехнический институт в 1975 г. Область научных интересов – машиноведение, системы приводов, эластогидродинамические задачи обеспечения герметичности гидро-пневмовакуумных систем, математическое моделирование и системный анализ. E-mail: eresko07@mail.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Алтайский политехнический институт имени И. И. Ползунова в 1985 г.; аспирантуру Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина в 1989 г. Область научных интересов – стратегический и инновационный менеджмент. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Ерыгина Лилия Викторовна – доктор экономических наук, профессор, декан факультета заочного и дополнительного образования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский институт цветных металлов в 1985 г. Область научных интересов – планирование и контроль, система контроллинга деятельности предприятий. E-mail: erigina@sibsau.ru

Ефимов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1991 г. Область научных интересов – автоматизация проектирования многопроцессорных вычислительных систем обработки информации и управления в режиме реального времени. E-mail: efimov@bk.ru.

Жасан Валерий Семенович – начальник конструкторского отдела ОКБ «Факел». Окончил Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана в 1984 г. Область научных интересов – разработка электроактивных двигательных установок. Т. 8(4012)55-66-10.

Жуковская Юлия Васильевна – методист аэрокосмического колледжа Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева. Окончила Иркутскую государственную сельскохозяйственную академию в 2004 г. Область научных интересов – разработка методов и механизмов интеграции вузовской науки в национальную инновационную систему и мировой инновационный процесс, развитие методов и форм коммерциализации вузовских инноваций в малых инновационных предприятиях, исследование экономических систем, их генезис, формирование, развитие, прогнозирование. E-mail: ak@sibsau.ru.

Заблоцкий Сергей Геннадьевич – аспирант Ульмского университета (Германия), магистр техники и технологий. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 г. Область научных интересов – интеллектуальные технологии автоматического распознавания речи. E-mail: sergey.zablotskiy@uni-ulm.de.

Зябрев Илья Николаевич – генеральный директор компании AlterTrader Research Ltd (Москва). Окончил Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова в 1986 г. Область научных интересов – информационный поиск, финансовая математика. E-mail: info@altertrader.com.

Иванников Вадим Александрович – старший преподаватель кафедры финансов и кредита Красноярского государственного торгово-экономического института. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2000 г. Область научных интересов – мировая экономика. E-mail: va_ivannikov@mail.ru.

Калашникова Екатерина Александровна – преподаватель кафедры маркетинга в агропромышленном комплексе Красноярского государственного аграрного университета. Окончила Красноярский государственный аграрный университет в 2007 г. Область научных интересов – экономика. E-mail: rekrut-tywe@mail.ru.

Карасева Маргарита Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский государственный педагогический институт в 1990 г. и Сибирскую аэрокосмическую академию в 1999 г. Область научных интересов – мультилингвистическая технология обучения иностранным языкам, разработка частотных терминологических словарей. Т. 8-902-992-64-12.

Картушинский Алексей Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт в 1987 г. Область научных интересов – океанология, климатология, метеорология, экология, гидрофизика, гидробиология, математическое моделирование. E-mail: kartalvas@rambler.ru.

Кацунова Анастасия Сергеевна – ассистент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2006 г. Область научных интересов – многомерный комплексный анализ. E-mail: askatsunova@gmail.com.

Кацура Александр Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Иркутский политехнический институт в 1982 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация, ремонт, надежность и прочность летательных аппаратов. E-mail: katsu60@mail.ru.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, ректор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1985 г. Область научных интересов – отказоустойчивые программные архитектуры, мультиверсионное программное обеспечение, многоатрибутивные методы принятия решений, мультилингвистические технологии обучения. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Колесникова Татьяна Сергеевна – инженер-конструктор отдела оборудования гражданского назначения ОАО «Красноярский машиностроительный завод». Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – прочностные расчеты. E-mail: tati_mystigue@mail.ru.

Кондрин Александр Вячеславович – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – автоматизация наукоемких предприятий, системы управления наукоемких предприятий. E-mail: Alexander.kondrin@gmail.com.

Константинов Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Центра планетных иследований, ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина». Окончил Московский авиационный институт имени Серго Орджоникидзе в 1974 г. Область научных интересов – проектирование космических систем и комплексов. E-mail: konstantinov@laspace.ru.

Корольков Анатолий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета электроники и системотехники Московского государственного университета леса. Окончил Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова в 1976 г. Область научных интересов – вычислительная гидродинамика невесомости. E-mail: korolkov@mgul.ac.ru.

Коротков Максим Федорович – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов – проектирование замкнутых систем электропривода переменного тока. E-mail: hamsterboo@mail.ru.

Кошур Владимир Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной техники института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончил Новосибирский государственный университет в 1971 г. Область научных интересов – компьютерное моделирование задач механики сплошных сред и интеллектуальных материалов, адаптивное управление и оптимизация систем и процессов, численные методы, параллельные и мягкие вычисления; искусственные нейронные сети. E-mail: VKoshur@sfu-kras.ru.

Краев Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева, академик Российской академии естественных наук и Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского, член-корреспондент Академии наук высшей школы РФ, заслуженный деятель науки и техники РФ. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – гидродинамика систем подачи энергодвигательных установок.

Краева Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2002 г. Область научных интересов – насосные агрегаты подачи малорасходных систем ракетоносителей. E-mail: kat-belka@yandex.ru

Краснов Павел Олегович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного технологического университета. Окончил Красноярский государственный университет в 1999 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Краснощек Анатолий Анисимович – кандидат экономических наук, начальник Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта в 1988 г. Область научных интересов – экономика и управление на предприятии (экономическая безопасность). E-mail: trubina_fbu@irgups.ru.

Кожевникова Татьяна Александровна – аспирант Сибирского государственного технологического университета. Окончила Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – первопринципные расчеты, наноструктуры. E-mail: entalpi@mail.ru.

Кузубов Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической и неорганической химии института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный университет в 1997 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Кукарцев Анатолий Викторович – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1998 г. Область научных интересов – управление бизнес-процессами. E-mail: kempf@sibsau.ru.

Кукарцев Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных экономических систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмического университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2003 г. Область научных интересов – автоматизация управления, системный анализ. E-mail: vlad_2000@mail.ru.

Кустов Денис Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – мультилингвистические технологии поиска и обработки информации. E-mail: saor_kustov@sibsau.ru.

Кустова Елена Александровна – директор аэрокосмического колледжа Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, заслуженный педагог Красноярского края, почетный работник среднего профессионального образования РФ. Окончила Красноярский государственный педагогический институт в 1986 г. Область научных интересов – управление образовательными учреждениями, разработка методов и механизмов интеграции вузовской науки в национальную инновационную систему и мировой инновационный процесс, развитие методов и форм коммерциализации вузовских инноваций в малых инновационных предприятиях, исследование экономических систем, их генезис, формирование, развитие, прогнозирование. E-mail: ak@sibsau.ru.

Лапко Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Фрунзенский политехнический институт в 1971 г. Область научных интересов – непараметрическая статистика, распознавание образов, моделирование и оптимизация систем при неполной информации. E-mail: lapko@icm.krasn.ru.

Лапко Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космических средств и технологий Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1996 г. Область научных интересов – непараметрическая статистика, моделирование систем, непараметрические коллективы решающих правил, распознавание образов. E-mail: lapko@icm. krasn.ru.

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1988 г. Область научных интересов – повышение качества поверхностного слоя деталей летательных аппаратов. Т. 8(391)266-71-61.

Ленченко Виктор Макарович – кандидат физико-математических наук, профессор Сибирского федерального университета. Окончил Среднеазиатский государственный университет в 1951 г. Область научных интересов – физика полупроводников, структура твердых тел. Т. 8(391)221-29-16.

Лимаренко Герольд Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и экспериментальной механики машин политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана в 1956 г. Область научных интересов – машиностроение, приводы линейного перемещения. Т. 8(391)249 75-55.

Логинов Юрий Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1976 г. E-mail: loginov@sibsau.ru.

Лопатин Павел Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Будапештский технический университет в 1991 г. Область научных интересов – интеллектуальные роботы, моделирование на ЭВМ взаимодействия «человек–человек». E-mail: Ivt_plopatin@sibsau.ru.

Максимов Станислав Анатольевич – ведущий экономист ОАО «Красноярский машиностроительный завод». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2006 г. Область научных интересов – экономические науки. E-mail: sa_maksimov@mail.ru.

Малько Леонид Степанович – доцент кафедры управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1969 г. Область научных интересов – технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин. Т. 8(391)291-90-94.

Мартынов Максим Борисович – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора – руководитель ОКБ, ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина». Окончил Московский авиационный институт имени Серго Орджоникидзе в 1996 г. Область научных интересов – проектирование космических систем и комплексов. E-mail: maxim.martynov@ laspace.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, заведующий отделением кибернетики и системного анализа Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук при Сибирском госу-

дарственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Фрунзенский политехнический институт в 1968 г. Область научных интересов – кибернетика, теория стохастических систем управления. Т. 8(391)290-50-11.

Мозжерин Александр Владимирович – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2008 г. Область научных интересов – физика полупроводников, структурные дефекты в кристаллах. Т. 8(391)262-95-94.

Назаров Анатолий Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и математической статистики факультета прикладной математики и кибернетики Томского государственного университета. Окончил Томский государственный университет в 1970 г. Область научных интересов – исследования случайных потоков однородных событий, систем массового обслуживания моделей компьютерных сетей. E-mail: anazarov@fpmk.tsu.ru.

Новиков Евгений Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Воронежский государственный университет в 1978 г. Область научных интересов – вычислительная математика, математическое моделирование. E-mail: novikov@icm.krasn.ru.

Новиков Юрий Михайлович – кандидат технических наук, заведующий отделом научно-производственного центра «КПСМ-фильтр» НИИ экспериментальной медицины Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Окончил Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана в 1974 г. Область научных интересов – разработка проницаемых конструкций из комбинированных пористых сетчатых материалов и создание технологий их получения. E-mail: bolshakov-va@yandex.ru.

Пахомов Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 г. Область научных интересов – микропроцессорные системы управления электроприводов, модальные регуляторы. E-mail: pnalex@mail.ru.

Першин Александр Сергеевич – аспирант кафедры радиотехники Сибирского федерального университета. Окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 2009 г. Область научных интересов – разработка контурных антенн. E-mail: Pershin802@mail.ru.

Петухов Николай Юрьевич – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – фрактальный анализ, статистические характеристики текстурных изображений, распознавание текстур, искусственный интеллект. E-mail: n_petukhov@sibsau.ru.

Пожарков Олег Витальевич – руководитель отдела по информационному поиску компании Alter-Trader Research Ltd (Москва). Окончил Красноярский государственный технический университет в 2004 г. Область научных интересов – системный анализ, информационный поиск. E-mail: pozharkoff@mail.ru.

Пожаркова Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2003 г. E-mail: pozharkova@mail.ru.

Полянский Константин Владимирович – аспирант кафедры информатики политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2008 г. Область научных интересов – машинный перевод. E-mail: kostyan785@mail.ru.

Попов Захар Иванович – младший научный сотрудник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский федеральный университет в 2007 г. Область научных интересов – первопринципные расчеты, наноструктуры. E-mail: zipcool@bk.ru.

Потапенко Мира Юрьевна – инженер ОКБ «Факел». Окончила Российский государственный университет имени И. Канта в 2009 г. Область научных интересов – исследования рабочих процессов в электроактивных двигателях. E-mail: mira-world@yandex.ru.

Протевень Игорь Сергеевич – аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – исследование нестационарных турбулентных течений в агрегатах подачи энергодвигательных установок летательных аппаратов. E-mail: kayerfor@mail.ru.

Пшенко Елена Борисовна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский институт космической техники в 1990 г. Область научных интересов – повышение качества поверхностного слоя деталей летательных аппаратов. Т. 8(391)291-90-37.

Пьянков Дмитрий Игоревич – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – цифровая обработка изображений, стереозрение. E-mail: slicktail87@gmail.com.

Рыбакова Елена Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента Сибирского государственного аэрокосмического университета

имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – инвестирование воспроизводства основных производственных фондов. E-mail: Rybakova@sibsau.ru.

Сапожников Владимир Борисович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО НТВЦ «ЭДУКОН». Окончил Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана в 1971 г. Область научных интересов – гидродинамика и тепломассообмен в жидкостных ракетных двигательных установках. E-mail: sapojnikov47@mail.ru.

Севастьянова Елена Павловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономической теории института экономики, управления и природопользования Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный университет в 2000 г. Область научных интересов – государственное вмешательство в рыночную экономику. E-mail: selena7812@yandex.ru.

Семенкин Евгений Станиславович – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Кемеровский государственный университет в 1982 г. Область научных интересов – моделирование и оптимизация сложных систем, интеллектуальный анализ данных, эволюционные алгоритмы. E-mail: eugenesemenkin@yandex.ru.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-экономических наук Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1975 г. Область научных интересов – механика твердого тела, математическое моделирование в экономике. E-mail: sen@sibsau.ru.

Сержантова Мария Викторовна – аспирант кафедры физической и неорганической химии института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: sunnise.86@mail.ru.

Слепов Дмитрий Сергеевич – руководитель клиентского отдела ООО «СТБ». Окончил Красноярский государственный университет в 2004 г. Область научных интересов – ценообразование производных ценных бумаг. E-mail: dsslepov@gmail.com.

Смешко Юрий Викторович – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – непараметрические методы моделирования и управления сложными системами. E-mail: yurasm@inbox.ru.

Снетков Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела по организации приема студентов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 2000 г. Область научных интересов – финишная обработка, термодинамика, технология машиностроения. E-mail: snetkov@list.ru.

Станишевская Ольга Сергеевна – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, диспетчер инженерно-экономического факультета Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – экономические науки. Т. 8(391)291-92-99.

Судыко Елена Александровна – аспирант кафедры теории вероятностей и математической статистики факультета прикладной математики и кибернетики Томского государственного университета. Окончила Томский государственный университет в 2008 г. Область научных интересов – теория вероятностей, теория массового обслуживания, исследование RQ-систем, математическое моделирование компьютерных сетей случайного доступа. E-mail: Esudyko@yandex.ru.

Сутягин Александр Валерьевич – аспирант кафедры управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – технологическое обеспечение качества. Т. 8(391)291-90-94.

Томилин Феликс Николаевич – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физики магнитных явлений Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1999 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: felixnt@gmail.com.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1975 г. Область научных интересов – технология производства летательных аппаратов и технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. Т. 8(391)291-92-14.

Тупицын Илья Владимирович – аспирант кафедры информационной и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – цифровая обработка изображений, стереозрение, триангуляция, совмещение изображений. E-mail: toupitsyn@gmail.com.

Узолин Евгений Юрьевич – аспирант кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 2008 г. Область научных интересов – разработка антенн с дихроичной структурой. E-mail: Armilion@sibmail.com.

Фадеева Маргарита Сергеевна – аспирант кафедры вычислительной техники института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2003 г. Область научных интересов – математическое моделирование задач акустики, оптимизация, управление динамическими процессами на основе искусственных нейронных сетей. E-mail: ritajv@krw.ru.

Федоренко Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский политехнический институт в 1970 г. Область научных интересов – частотно-управляемый асинхронный электропривод. Т. 8(391)243-64-75.

Федоров Александр Семенович – доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных явлений Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: alex99@ iph.krasn.ru.

Федорова Наталья Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности Сибирского федерального университета. Окончила Новосибирский государственный университет в 1978 г. Область научных интересов – математическое моделирование композиционных материалов, армированных криволинейными семействами волокон. E-mail: ran@akadem.ru.

Фрост Марина Б. – кандидат физико-математических наук, профессор математического факультета Кларк-колледжа. Окончила Новосибирский государственный университет в 1984 г. Область научных интересов – дифференциальные уравнения и механика.

Ходяев Артем Викторович – ведущий инженер ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть». Окончил Сибирский федеральный университет в 2008 г. Область научных интересов – обработка спутниковой информации, океанология, статистическая обработка данных. E-mail: artymail@mail.ru.

Чуркин Эрнст Михайлович – доктор технических наук, профессор Московского авиационного института (технического университета). Окончил Военную инженерную академию имени Ф. Э. Дзержинского в 1964 г. Область научных интересов – экспертно-моделирующие системы и технологии. E-mail: Ernst.Churkin@cascadefilm.ru.

Шабалов Андрей Андреевич – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – автоматизированное проектирование интеллектуальных информационных технологий. Т. 8(391)291-91-41.

Шаймарданов Лев Гайнуллович – доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и двигателей Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, член-корреспондент Международной академии наук высшей школы. Окончил Куйбышевский авиационный институт в 1966 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей. Т. 8(391)94-65-29.

Швец Александр Валерьевич – студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов – моделирование и оптимизация сложных систем, эволюционные алгоритмы. E-mail: alexandershvets@mail.ru.

Шевчугов Максим Викторович – старший преподаватель кафедры проектирования и экспериментальной механики машин политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2002 г. Область научных интересов – машиностроение, приводы линейного перемещения. E-mail: absolutes@mail.ru.

Шевырногов Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института биофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский политехнический институт в 1977 г. Область научных интересов – биофизика, крупномасштабные и синоптические процессы в океане, биоокеанология, геология и природопользование, геоинформатика и географическая картография. E-mail: ap@ibp.ru.

Энгель Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем Хакасского государственного университета имени Н. Ф. Катанова, докторант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова. Область научных интересов – нейроинформатика, нечеткая логика. E-mail: ekaterina.en@mail.com.

Яшкин Валерий Игоревич – бакалавр Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – менеджмент. E-mail: yakov.mail@rambler.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Engel E. A., Kovalev I. V. Information processing using intelligent algorithms by solving WCCI 2010 tasks 4
Frost M. B. Determining the source of transverse oscillations of an elastic rod 8
Агафонов Е. Д., Смешко Ю. В. Непараметрическая оценка условной плотности распределения вероятности в задаче управления статическим объектом 11
Ереско А. С., Ереско С. П. Динамический анализ привода рычажных гидромеханизмов грузоподъёмных машин 16
Заблоцкий С. Г., Семенкин Е. С., Швец А. В. Коэволюционный асимптотический генетический алгоритм для формирования предложений по слоговой модели в системе автоматического распознавания слитной речи 20
Зябрев И. Н., Василенко К. Н., Пожарков О. В., Пожаркова И. Н. Сравнительный анализ спектральной языковой модели и других моделей информационного поиска 26
Карасева М. В., Кустов Д. В. Информационно-терминологический базис в мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии 29
Кацунова А. С. О повторном особом интеграле Коши–Сеге 31
Кошур В. Д., Фадеева М. С. Нейроуправление активными источниками для подавления акустических волн в заданной области 35
Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая регрессия в условиях частичных сведений о виде восстанавливаемых закономерностей 39
Ленченко В. М., Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В. Анализ тепловых и рекомбинационных потерь фототока в солнечных элементах космических аппаратов 43
Лимаренко Г. Н., Головин М. П., Шевчугов М. В. Синтез профиля кулачка, взаимодействующего с внутренним кольцом подшипника качения в поступательной волновой передаче 48
Лопатин П. К. Алгоритм перемещения манипуляционного робота в среде с неизвестными препятствиями 53
Медведев А. В. Теория непараметрических систем. K-модели 57
Назаров А. А., Судыко Е. А. Неэргодичность математической модели компьютерной сети случайного доступа 62
Новиков Е. А. Разработка (4, 2)-метода третьего порядка точности для решения жестких задач 65
Пахомов А. Н., Коротков М. Ф., Федоренко А. А. Модальное управление электроприводом переменного тока 70
Полянский К. В. Построение фреймовой модели перевода с использованием кластеризации термов 74
Семенкин Е. С., Шабалов А. А., Ефимов С. Н. Автоматизированное проектирование коллективов интеллектуальных информационных технологий методом генетического программирования 77
Сенашов С. И. Законы сохранения в задаче о продольной плоской волне нагрузки в упругопластическом стержне 82
Слепов Д. С. Оценивание корреляционных кредитных деривативов 85
Тупицын И. В. Реконструкция трехмерной модели объекта на основе стереопары при решении задач 3D-моделирования 88
Федорова Н. А. Моделирование деформирования плоских конструкций со сложными криволинейными структурами армирования 92
Чуркин Э. М. Информационная система «Единое терминологическое пространство» 99

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Гопанчук В. В., Жасан В. С., Потапенко М. Ю. Повышение эффективности газораспределения в ускорительном канале электрореактивного двигателя 104
Кацура А. В. Применение марковских процессов при техническом обслуживании и ремонте летательных аппаратов с учетом критерия коррозионной стойкости 110
Краев М. В., Протевень И. С. Структура поверхности раздела частично смоченного диска с радиальными лопатками 113
Краева Е. М. Гидродинамика потока вязкой жидкости в решетке профилей лопаток центробежной гидромашины 116
Першин А. С., Узолин Е. Ю. Адаптивные многолучевые антенны ОАО «ИСС» 120

Сапожников В. Б., Гришко Я. П., Корольков А. В., Большаков В. А., Новиков Ю. М., Константинов С. Б., Мартынов М. Б. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков 122
Ходяев А. В., Шевырногов А. П., Картушинский А. В. Программное обеспечение тематической обработки спутниковых данных для экологического мониторинга вод Мирового океана 127
Шаймарданов Л. Г., Бойко О. Г. Метод решения задачи расчета надежности сложных систем при переменных параметрах потоков отказов агрегатов 131

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Буров А. Е. Прогнозирование изменения формы композитного уголкового элемента за счет технологических напряжений 136
Левко В. А., Снетков П. А., Пшенко Е. Б. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки каналов с переменной формой сечения 140
Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Кожевникова Т. А. Влияние атомов примеси на скорость диффузии лития в кристаллическом кремнии 146
Сержантова М. В., Кузубов А. А., Федоров А. С., Томилин Ф. Н., Краснов П. О. Теоретическое исследование влияния деформации на электронную структуру монослоя гексагонального нитрида бора 150
Сутягин А. В., Малько Л. С., Трифанов И. В. Технологические особенности многолезвийной обработки винтовых поверхностей ротационным точением 156

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Абелян А. С. Управление устойчивостью хозяйственных систем в условиях модернизационных изменений 164
Агафонова Н. Г. Интеллектуальный потенциал: сущность, особенности воспроизводства 169
Алексеева Е. Ю., Ерыгин Ю. В. Инструменты стратегического планирования социальных инвестиций 173
Беляков Г. П., Еремеев Д. В. Исследование содержания понятий: техническое перевооружение, техническое переоснащение, модернизация 177
Бойко А. А., Рыбакова Е. С. Роль лизинга в обновлении основных производственных фондов предприятий ракетно-космической промышленности 182
Бубнов В. А. Формирование государственно-частного партнерства на региональном уровне через лизинговые операции 188
Гончаров А. Е. Методика подсчёта прибыли от англо-сибирской торговли по Северному морскому пути в 1886–1899 гг. 191
Ерыгина Л. В., Кустова Е. А., Жуковская Ю. В. Возможности коммерциализации инновационных разработок вуза 195
Иванников В. А. Место и роль инновационных технологий в развитии экономической системы 201
Калашникова Е. А. Оценка инновационного потенциала как фактора конкурентоспособности вуза 206
Кондрин А. В., Кукарцев В. В. Стратегия внедрения CALS-технологий 210
Краснощек А. А. Некоторые аспекты анализа и оценки экономической безопасности 214
Кукарцев А. В., Яшкин В. И. Анализ инструментов управления бизнес-процессами современного предприятия 218
Лобанова Е. Э. Классификация служб содействия занятости выпускников учреждений профессионального образования как элемент методологических основ взаимодействия рынка услуг профессионального образования и рынка труда 224
Максимов С. А., Станишевская О. С. Оценка влияния реструктуризации на величину инновационного потенциала в системе контроллинга предприятий ракетно-космической промышленности 228
Севастьянова Е. П. Неоклассическая парадигма и причины современного экономического кризиса 232

Сведения об авторах 238

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Энгель Е. А., Ковалев И. В. Использование интеллектуальных методов для обработки информации на примере решения задач WCCI 2010 4
Фрост М. Б. Определение источника поперечных колебаний упругого стержня 8
Agafonov E. D., Smeshko Yu. V. Nonparametric estimation of conventional density in problem of statical object control 11
Eresko A. S., Eresko S. P. Dynamic analysis of leverage drive of hydraulic mechanisms of lifting machines 16
Zablotskiy S. G., Semenkin E. S., Shvets A. V. Coevolutionary asymptotic genetic algorithm for syllable model based identification of sentences in automatic recognition of continuous speech 20
Zyabrev I. N., Vasilenko K. N., Pozharkov O. V., Pozharkova I. N. The comparative analysis of spectral language model and other information retrieval models 26
Karaseva M. V., Kustov D. V. Informational and terminological basis in multilingual adaptive-training technology 29
Katsunova A. S. On iterative singular Cauchy–Szego integral 31
Koshur V. D., Fadeeva M. S. Management of active acoustic sources by means of a neural network for suppression of acoustic waves in the set area 35
Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric regression in the conditions of partial data on a mode of restored legitimacies 39
Lenchenko V. M., Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V. Analysis of heat and photon recombination losses in solar cells 43
Limarenko G. N., Golovin M. P., Shevchugov M. V. Synthesis of cam contour interacting inner ring in translational harmonic gear drive 48
Lopatin P. K. Algorithm of a manipulating robot movement in an environment with unknown obstacles 53
Medvedev A. V. Theory of non-parametric systems. K-models 57
Nazarov A. A., Sudyko E. A. Nonergodicity of mathematic model of a random access network 62
Novikov E. A. Development of (4,2)-method of order 3 for solving stiff problems 65
Pakhomov A. N., Korotkov M. F., Fedorenko A. A. Alternating current electric drive modal control 70
Polyansky K. V. Translating frame model construction with use of terms clustering 74
Semenkin E. S., Shabalov A. A., Efimov S. N. Automated design of intelligent information technology kollektives by means of genetic programming technique 77
Senashov S. I. Conservation laws in the problem about plane wave of loading in elastic-plastic rod 82
Slepov D. S. Valuation of correlation-dependent credit derivatives 85
Toupitsyn I. V. Reconstruction of three dimensional model of the object by stereopair for solving 3D modelling tasks 88
Feodorova N. A. Simulating the plane aircraft constructions deformation with complex curvilinear reinforcement strucnures 92
Churkin E. M. The information system “uniform terminological space” 99

PART 2. AVIATIONAND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Gopanchuk V. V., Zhasan V. S., Potapenko M. Ju. Increase of efficiency of gas distribution in the accelerating channel of an electrojet engine 104
Katsura A. V. Use of methods of nondestructive test for exposure of corrosion damage of the airframe structure with account of corrosive damage criteria 110
Kraev M. V., Proteven I. S. The structure of the interface partially wet disc with radial vanes 113
Kraeva E. M. Hydrodynamics of viscous fluid flows in the lattice of profiles blades of centrifugal hydraulic machine 116
Pershin A. S., Uzolin E. Yu. Adaptive multi beam antenna JSC «ISS» 120
Sapozhnikov V. B., Grischko Ya. P., Korolkov A. V., Bolshakov V. A., Novikov Yu. M., Konstantinov S. B., Martynov M. B. Application of combined porous-mesh materials in construction of intratank devices of propulision installations of spacecrafts, final steps of carrier rockets and upper-stages 122
Khodyaev A. V., Shevyrnogov A. P., Kartushinskiy A. V. Thematic processing software of satellite data for ocean ecological monitoring 127
Shaymardanov L. G., Boyko O. G. Complex systems reliability calculation task solution method with variable aggregates breakdown stream parameters 131

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Burov A. E. Predicting of a composite angle element warpage due to induced stress process 136
Levko V. A., Snetkov P. A., Pshenko E. B. Research of abrasive flow machining process channels with variable cross section area 140
Popov Z. I., Fedorov A. S., Kuzubov A. A., Kojevnikova T. A. Influence of impurities on rate of diffusion of lithium in crystal silicon 146
Serzhantova M. V., Kuzubov A. A., Fedorov A. S., Tomilin F. N., Krasnov P. O. Theoretical study of the influence of deformation on the electronic structure of a hexagonal boron nitride monolayer 150
Sutjagin A. V., Malko L. S., Trifanov I. V. Technological features multifluted of processing of screw surfaces rotational sharpen 156

PART 4. ECONOMICS

Abeljan A. S. Management of stability of economic systems in the conditions of modernization changes 164
Agafonova N. G. Intellectual potential: essence, features of reproduction 169
Alexeeva E. Yu., Erygin Yu. V. Tools of strategic planning of social investments 173
Belyakov G. P., Eremeev D. V. Study of concepts: technical upgrading, retooling, modernization 177
Boiko A. A., Rybakova E. S. Leasing role in renewal of basic production capital funds of space-rocket industry enterprises 182
Bubnov V. A. Formation of state-private partnership at a regional level through leasing operations 188
Goncharov A. E. A method of calculating profits from british-siberian commerce via the Northern Sea Route 1886–1899 191
Erygina L. V., Kustova E. A., Zhukovskaya Yu. V. Possibilities of commercialization of innovations developing at institutions of higher education 195
Ivannikov V. A. Place and role of innovative technologies in development of economic system 201
Kalashnikova E. A. Estimation of innovative potential as factor of competitiveness of high school 206
Kondrin A. V., Kukartsev V. V. CALS-technologies implementation strategy 210
Krasnoshchek A. A. Some aspects of analysis and evaluation of economic security 214
Kukartsev A. V., Yashkin V. I. Analysis of tools for managing business processes of modern enterprise 218
Lobanova E. E. Classification of employment services of establisments of vocational training as an element of metodological bases of interaction of the market of services of vocational training and labour market 224
Maksimov S. A., Stanishevskaya O. S. Estimation of influence of restructing on size of innovative potential in system of controlling of the space-rocket industry enterprises 228
Sevastyanova E. P. Neoclassical paradigm and causes of the modern economic crisis 232

Приложение № 2
к Положению № 63/74 от 15.03.06
о журнале «Вестник СибГАУ»

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК СИБГАУ»

Общие требования. Тексты статей представляются в редакцию журнала в электронном и печатном виде на русском и английском языках. Русскоязычная версия должна сопровождаться английским переводом фамилии автора (авторов); названия статьи; аннотации; ключевых слов (см. пример оформления статьи).

Файл со статьей представляется на любом электронном носителе.

На последней странице ставится подпись автора (авторов) статьи. Количество авторов одной статьи – не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй раз – в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

Оригинал должен быть чистым, не помятым, без правок, вписанных от руки. Страницы нумеруются карандашом на обороте.

Электронная копия. Статья набирается в программе Microsoft Word.

Содержание. В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения.

Статья должна заканчиваться выводом. Текст вывода набирается отдельным абзацем (абзацами), в котором акцентируется новизна результатов, эффективность их использования и др.

Объем статьи: 7–8 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки).

Параметры страницы. Формат А4 (210×297 мм). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт – Times New Roman, размер 12 пт.

По центру помещаются инициалы и фамилия автора (авторов).

Не допускается (!) в тексте статьи набирать слова прописными (заглавными) буквами, жирным шрифтом или курсивом, а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформление набора, выполняемого в журнале.

Ниже по центру шрифтом 12 пт печатается название статьи и через строку курсивом – аннотация, ключевые слова (не более 6).

Основной текст статьи размещается через пробел от аннотации. Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается. Заголовки глав должны быть центрированы.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Ссылки на литературные или иные источники оформляются числами, заключенными в квадратные скобки, например [1]. Ссылки должны быть последовательно пронумерованы.

При наличии гранта ссылка на грант помещается внизу полосы под строками основного текста (подстрочное примечание).

Примечания. Смысловые пояснения основного текста или дополнения к нему оформляются в виде внутритекстовых примечаний среди строк основного текста специальной рубрикой, выделенной светлым курсивом: *Примечание.* (одно примечание), *Примечания*: (несколько примечаний). Отделяются от текста *точкой* (если стоят в единственном числе в подбор к тексту примечания). Примечания должны быть последовательно пронумерованы.

Формулы. Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов – символами (шрифт Symbol). Специальные сложные символы, а также многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Набор математических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

– русские и греческие символы – прямым шрифтом;
– латинские – курсивом;
– размер обычного символа – 12 пт;
– крупный индекс – 10 пт;
– мелкий индекс – 9 пт;
– крупный символ – 11 пт;
– мелкий символ – 10 пт.

Формулы, набранные отдельными строками, располагают по центру.

Не допускается (!) набор в основном тексте статьи простых латинских, греческих или специальных символов в редакторе формул.

Таблицы должны быть последовательно пронумерованы. Слово «таблица» набирается светлым курсивом с выравниванием вправо, шрифтом 11 пт, например *Таблица 1*, ниже – заглавие таблицы (набирается жирным шрифтом по центру). Если таблица имеет большой объем, то она может быть помещена на отдельной странице, а в случае, когда она имеет значительную ширину, – на странице с альбомной ориентацией.

Иллюстрации. Оформляются отдельным файлом с расширением tiff. Последовательно пронумеровываются обычным шрифтом без кавычек с выравниванием по центру, например, Рис. 1. Могут содержать подрисуночную подпись, шрифтом 11 пт. Иллюстрации могут быть сканированы с оригинала (в градациях серого с разрешением 150 dpi) или выполнены средствами компьютерной графики. Не принимаются цветные иллюстрации и иллюстрации с разрешением 300 dpi и более.

Библиографические ссылки составляются в соответствии с действующими требованиями к библиографическому описанию и помещаются после основного текста (ГОСТ 7.0.5–2008).

К печатному варианту статьи необходимо приложить:

1) экспертное заключение о возможности открытой публикации;

2) внешнюю рецензию (рецензент, желательно, не ниже ученой степени доктора наук);

3) сведения об авторе:

– фамилия, имя, отчество (полностью);

– ученая степень, звание, должность;

– вуз, год его окончания;

– область научных интересов;

– место работы, номер телефона;

– адрес для переписки (для иногородних);

– e-mail.

Внимание! Материалы статьи авторы сдают лично секретарю журнала или высылают почтой с указанием обратного адреса. По электронной почте статьи не принимаются.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

УДК 621.396.96.001(07)

И. А. Иванов

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ДВУХКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ*

Рассмотрена децентрализованная обработка информации в двухканальных измерительных системах при косвенном измерении для различных алгоритмов фильтрации оценки вектора состояния в измерительных пунктах и пункте обработки информации. Проведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования синтезированных алгоритмов.

Ключевые слова (не более 6):

Задача обеспечения высокой точности оценивания координат и параметров траектории движения объекта может быть решена за счет применения многоканальных измерительных систем с оптимальной централизованной обработкой.

(Продолжение текста публикуемого материала).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-01-00912).

Библиографические ссылки

1. Гришин Б. П., Казаринов Ю. М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М. : Радио и связь, 1985.

2. Медведев А. В. О моделировании организационных процессов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та : сб. науч. тр. Вып. 1. Красноярск, 2000. С. 173–191.

I. A. Ivanov

DECENTRALIZED ALGORITHMS OF INFORMATION PROCESSING IN TWO-CHANNEL MEASURE SYSTEMS

It is covered a decentralized algorithms of information processing in two-channel measure systems in case of an indirect measuring for different filtration algorithms of a condition vector estimation at the reception measure station and the station of information processing. Comparative analysis is carried out with a help of imitation modeling of synthesized algorithms.

Keywords: