

**ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 2 (46)

2018

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Попов А. А., Холдонов А. А.</i> Структурная оптимизация нечетких регрессионных моделей с минимизацией ошибки прогноза на обучающей и тестовой выборке.....	5
<i>Приймак А. А.</i> Использование нейронных сетей для выделения составляющих в режиме реального времени.....	18
<i>Ляпин А. М.</i> Методика сбора и интеллектуального анализа коротких сообщений из сети Интернет с целью выявления внештатных ситуаций в дорожно-транспортной инфраструктуре.....	27
<i>Токарев А. Н.</i> Уменьшение нагрузки и повышение производительности вычислений в распределенных вычислительных системах с ненадежными узлами.....	37
<i>Шумилина Н. А.</i> Информационно-управляющая система для решения управленческих задач проектов промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования.....	48
<i>Дементьев Е. А., Кан В. В., Свиштунов Б. Л.</i> Принятие решений о степени сформированности профессиональных компетенций студентов на основе мониторинга остаточных знаний	64
<i>Бождай А. С., Евсеева Ю. И.</i> Метод рефлексивной самоадаптации программных систем.....	74

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Попов Д. И.</i> Анализ эффективности подавления пассивных помех режекторными фильтрами	87
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Зверовщиков А. Е., Соловков Б. В., Зверовщиков Е. А.</i> Совершенствование режимов операции формования детали из термопласта на основе моделирования процесса заливки в САЕ-системе.....	96
---	----

Казанцев И. А., Бычков В. И., Казанцев А. И. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания	107
Митин С. Г., Бочкарев П. Ю. Модели и методики автоматизации процедур разработки структур технологических операций, реализуемых на оборудовании токарной группы.....	119
Попов В. М., Афонькина В. А., Левинский В. Н., Майоров В. И. Определение энергоэффективности машины цилиндрического типа для инфракрасной сушки высоковлажного биологического сырья в сравнении с аналогом	131
Алехин С. Н., Алехин А. С., Петросов С. П., Никишин В. В. Исследование условий процесса уравнивания в жидкостном автобалансирующем устройстве стиральных машин	140
Богомолов А. И., Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Модели сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых преград при ударном нагружении	154

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (46)

2018

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

- Popov A. A., Kholdonov A. A.** Structural optimization
of fuzzy regression models with minimization of a forecast
error on a training and test sample 6
- Priymak A. A.** The use of neural networks
for isolation of components in real time..... 18
- Lyapin A. M.** Method for collection and intellectual analysis of short
communications from the Internet network for the identification
of extra situations in road transport infrastructure 27
- Tokarev A. N.** Load reducing and capability rise of calculations
in distributed computational systems with unreliable nodes..... 37
- Shumilina N. A.** Information management system for solving
the management tasks of projects of industrial enterprises
risk-based on equipment failure 48
- Dement'ev E. A., Kan V. V., Svistunov B. L.** Decision-making
of the degree of professional formation competences of students
based on monitoring residual knowledge..... 64
- Bozhday A. S., Evseeva Yu. I.** Reflex self-adaptation
method of software systems 74

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

- Popov D. I.** Analysis of the efficiency of the passive
hindrances' suppression with rector filters 87

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

- Zverovshchikov A. E., Solovkov B. V., Zverovshchikov E. A.** Perfection
of the operation modes of forming details from thermoplast
based on modeling the filling process in the CAE-system..... 96

Kazantsev I. A., Bychkov V. I., Kazantsev A. I. Impact of thermophysical properties of piston on the operational characteristics of internal combustion engines	107
Mitin S. G., Bochkarev P. Yu. Models and methods of automation of procedures for development of structures of technological operations implemented on the equipment of the large group.....	119
Popov V. M., Afon'kina V. A., Levinskiy V. N., Mayorov V. I. Determination of energy efficiency of a cylindrical type machine for infrared drying of a highly mobile biological raw material in comparison with analog.....	131
Alekhin S. N., Alekhin A. S., Petrosov S. P., Nikishin V. V. Study of the conditions process of equilibration in the liquid autobalancing device for washing machines	140
Bogomolov A. I., Muyzemnek A. Yu., Kartashova E. D. Models of resistance to deformation and destruction of discrete-tissue overcomes under shock loading	154

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.23

DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-1

А. А. Попов, А. А. Холдонов

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЧЕТКИХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ОШИБКИ ПРОГНОЗА НА ОБУЧАЮЩЕЙ И ТЕСТОВОЙ ВЫБОРКЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Рассматривается проблема структурной оптимизации регрессионных моделей в рамках концепции нечетких систем (Fuzzy Systems). Структурная оптимизация регрессионных моделей подразумевает решение задачи по определению модели оптимальной сложности. Модель оптимальной сложности имеет хорошие обобщающие способности и не несет в себе эффект переобучения. Приведены различные критерии качества моделей, которые используют проверочную часть выборки.

Материалы и методы. В качестве метода оценивания всех неизвестных параметров моделей используется метод наименьших квадратов. В качестве систем правил использовалась модель Такаги – Сугено. Область действия факторов разбивалась на нечеткие партии. Для разбиения выборки на тестовую и обучающую части осуществляется построение D-оптимального плана. При этом основное внимание в работе уделено использованию в качестве критерия селекции моделей критерия стабильности, который представляет собой ошибку прогноза на обучающей и тестовой части выборки.

Результаты. Для оценки работоспособности данного критерия и процедуры разбиения выборки на обучающую и тестовую части проведен вычислительный эксперимент. При этом использовалось специально разработанное приложение. Экспериментальные данные моделировались. При этом в качестве модели использовалась кусочная линейная зависимость от входного фактора. Результаты проведенных вычислительных экспериментов нашли отражение в таблицах и рисунках. Контроль точности проверяемых моделей проводился по среднеквадратичной ошибке (MSE).

Выводы. Вычислительный эксперимент показал, что критерий стабильности, основанный на использовании тестовой выборки, полученной по процедуре оптимального планирования эксперимента, позволяет определять модель оптимальной сложности.

Ключевые слова: D-оптимальный план, критерий стабильности, метод наименьших квадратов, метод центра масс, модель Такаги – Сугено, нечеткие

© 2018 Попов А. А., Холдонов А. А. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

системы (Fuzzy System), обучающая выборка, оптимальное планирование эксперимента, оценивание параметров, регрессионная модель, система нормальных уравнений, тестовая выборка.

A. A. Popov, A. A. Kholdonov

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF FUZZY REGRESSION MODELS WITH MINIMIZATION OF A FORECAST ERROR ON A TRAINING AND TEST SAMPLE

Abstract.

Background. The paper considers the problem of string optimization of regression models within the concept of fuzzy systems (Fuzzy Systems). Structural optimization of regression models implies the solution of the problem of determining the model of optimal complexity. The model of optimal complexity has good generalizing abilities and does not carry the effect of retraining. Various criteria for selection of models are presented, which are based on splitting the sample into the training and test parts.

Materials and Methods. As a method of estimating unknown parameters, the least-squares method is used in the so-called global version. In this case, a joint evaluation of the whole set of unknown parameters is carried out. As rules systems, the Takagi-Sugeno model was used. When dividing the domain of input factors, trapezoidal membership functions were used. The problem of splitting a sample into a test and training part is proposed to be solved using the D-optimal experimental design method. At the same time, the main attention is paid to using the criterion of stability as a selection criterion for the models, which is a forecast error on the test part of the sample.

Results. To evaluate the efficiency of this criterion and the procedure for splitting the sample into a training and test part, a computational experiment was performed. For the computational experiment, the corresponding software was developed. The computational experiment was carried out on model data. The piecewise linear dependence on the input factor was used as the model of the data generator.

Discussion. The results of the computational experiments are given in separate tables and figures. The control of the accuracy of the tested models was based on the mean square error (MSE).

Conclusion. The computational experiment showed that the regularity criterion, based on the use of a test sample obtained by the procedure of optimal experiment planning, allows to determine the model of optimal complexity.

Key words: D-optimal plan, regularity criterion, least-squares method, center-of-mass method, Takagi-Sugeno model, fuzzy system, training sample, optimal experiment planning, parameter estimation, regression model, system of normal equations, test sample.

Введение

При построении регрессионных зависимостей эффективным инструментом моделирования считается методология нечетких систем (FS) [1–7]. Например, ее можно использовать при неполном знании структуры модели. Эффективность данной методологии определяется возможностью управлять сложностью модели. Однако при этом возникают и определенные трудности. К числу таких можно отнести возможность получения переусложненной модели. Если при этом в число факторов входят факторы, измеренные в номинальной шкале,

то необходимо учитывать условия идентифицируемости таких моделей [8–12]. Сложность моделирования при наличии выбросов связана с тем, что рассматриваемая методология направлена на получение описаний с локальными особенностями. Имеющиеся выбросы в данных могут провоцировать формирование такой локальной особенности, а также приводить к общему смещению решения, поскольку для его получения, как правило, используется метод наименьших квадратов (МНК). В этих ситуациях можно пытаться получать робастные решения [13]. Схожие проблемы, связанные с необходимостью обеспечения устойчивости решений, характерны и для других методов построения зависимостей, основанных на данных. В качестве примера можно рассматривать проблему получения робастных решений в методе опорных векторов [14–16].

Сложность получаемых нечетких регрессионных моделей, как мы отмечали, может варьироваться числом нечетких партиций и видом локальных моделей. При этом исследователь сталкивается с проблемой выбора оптимальной по сложности структуры модели. Для решения этой задачи назначаются определенные критерии «качества», которым должна удовлетворять искомая модель. Будем в дальнейшем называть их критериями селекции моделей. С многими из них можно познакомиться по обзорам [17, 18]. Нас в первую очередь будут интересовать так называемые внешние критерии селекции моделей, основанные на использовании тестовых выборок. На примере использования одного из них рассмотрим вопрос формирования тестовой части выборки с использованием планирования эксперимента.

1. Критерии селекции моделей на основе тестовых выборок

Пусть уравнение наблюдения за многофакторным объектом имеет вид

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon = \hat{X}\hat{\beta} + \varepsilon, \quad (1)$$

где $\hat{Y} - (n \times 1)$ – вектор ненаблюдаемого истинного выхода; $\hat{X} - (n \times m)$ – расширенная матрица плана, соответствующая регрессорам $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_m$; $\varepsilon - (n \times 1)$ – вектор ошибок измерения с математическим ожиданием $E(\varepsilon) = 0_n$ и дисперсией $E(\varepsilon\varepsilon^T) = \sigma^2 I_n$ (0_n – нулевой вектор, σ^2 – дисперсия ошибок, I_n – единичная матрица размера n). Регрессоры $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_m$ образуют множество $\hat{X}$ такое, что $\hat{X} \subset \mathfrak{X}$, где $\mathfrak{X}$ – некоторое расширенное множество регрессоров. Будем предполагать, что при наблюдении за объектом получена расширенная матрица плана $Z - (n \times p)$ и требуется определить множество $\hat{X}$ и получить оценку параметров $\hat{\beta}$. Выбирая то или иное подмножество регрессоров в (1), мы получаем рабочую модель, качество которой необходимо оценить. Для текущей модели из s регрессоров, образующих множество $L \subset \mathfrak{X}$, будем формировать матрицу наблюдений $X - (n \times s)$. В матричном виде уравнение наблюдения за откликом y запишем как

$$y = X\theta + e, \quad (2)$$

где $e - (n \times 1)$ – вектор случайных ошибок измерения, относительно которых выполнены стандартные предположения $E(e) = 0_n$, $E(ee^T) = \sigma^2 I_n$.

Разобьем выборку наблюдений W на две части A и B . Для решения задачи структурной идентификации, т.е. для выбора наилучшей модели для наблюдений (2), будем использовать следующие критерии качества моделей [18–22]:

– критерий регулярности:

$$\Delta^2(B) = \Delta^2(B/A) = \|y_B - X_B \hat{\theta}_A\|^2;$$

– критерий стабильности:

$$S^2 = \Delta^2(A \cup B/B) = \|y_W - X_W \hat{\theta}_B\|^2;$$

– критерий непротиворечивости:

$$n_{CM}^2 = \|X_W \hat{\theta}_A - X_W \hat{\theta}_B\|^2;$$

– критерий вариативности:

$$V^2 = (X_W \hat{\theta}_A - X_W \hat{\theta}_W)^T (X_W \hat{\theta}_W - X_W \hat{\theta}_B).$$

Теоретическое обоснование внешних критериев проведено в работах [18–21], а ряд их обобщений – в работах [22–24]. При этом в основу решения задачи структурной идентификации положен принцип J -оптимальности модели. Коротко остановимся на нем. J -оптимальная модель определяется решением задачи:

$$f^* = \operatorname{Arg} \min_{f \in \Omega_f} J(f), \quad (3)$$

где Ω_f – множество возможных моделей. Критерий $J(f)$ определяет собой среднеквадратичную ошибку предсказания незашумленного отклика на всей выборке W либо на прогнозной части B :

$$J(f) = \frac{1}{n} E \|\hat{y} - X \hat{\theta}\|^2,$$

$$J_B(f) = \frac{1}{n_B} E \|\hat{y}_B - X_B \hat{\theta}_A\|^2.$$

Напрямую воспользоваться $J(f)$ или $J_B(f)$ мы не можем. В качестве их оценок могут выступать перечисленные выше внешние критерии.

Помимо рассмотренных выше в задачах поиска моделей оптимальной сложности в качестве критерия селекции моделей может быть использован так называемый критерий скользящего контроля. В частности, он может быть использован в случае использования выборок небольшого объема. Как и для других внешних критериев селекции моделей, желательно, чтобы критерий скользящего контроля имел выраженный минимум на множестве моделей. Проблема повышения дискриминирующих свойств критерия скользящего контроля за счет выбора соответствующего плана эксперимента рассматривалась в [25].

2. Разбиение выборки для внешних критериев с использованием планирования эксперимента

Использование внешних критериев селекции при решении задачи выбора модели оптимальной сложности, отличных от критерия скользящего контроля, предполагает разбиение выборки наблюдения на две части: обучающую и проверочную. В данной работе для выбора модели оптимальной сложности мы будем использовать критерий стабильности. Для его вычисления потребуется сформировать обучающую и тестовую выборки. Подходы к решению задачи разбиения выборки с использованием планирования эксперимента предложены в работах [12, 26]. При этом повышение селективных свойств критериев регулярности и стабильности достигается тем, что в тестовую часть выборки включаются точки с малой дисперсией оценки математического ожидания отклика. Данный подход хорошо себя зарекомендовал при решении задачи настройки параметров алгоритма опорных векторов [27].

Вычислим математическое ожидание критерия регулярности [28]:

$$E(\Delta^2(B)) = (\hat{X}_B - P_{BA}\hat{X}_A\hat{\theta})^T (\hat{X}_B - P_{BA}\hat{X}_A\hat{\theta}) + \sigma^2 \left(n_B + \text{tr}(X_A^T X_A)^{-1} (X_B^T X_B) \right), \quad (4)$$

где

$$P_{BA} = X_B (X_A^T X_A)^{-1} X_A^T.$$

Второе слагаемое в (4) обозначим как $J_{\sigma}(s, \sigma)$. Исследуем возможность минимизации $J_{\sigma}(s, \sigma)$ путем выбора варианта разбиения X на X_A, X_B .

Введем следующие обозначения: пусть ξ есть непрерывный план, а $M(\xi)$ – информационная матрица, равная

$$X_A^T X_A / n_A = \sum_{i=1}^n p_i x_i x_i^T.$$

Далее пусть X определяет собой множество точек, среди которых необходимо выбрать n_A точек обучающей выборки, присвоив им веса, равные $1/n_A$. Оптимальный план ξ^* будем находить как решение задачи

$$\xi^* = \underset{p}{\text{Arg max}} \Psi[M(\xi)]. \quad (5)$$

В качестве функционала $\Psi[M(\xi)]$ будем рассматривать определитель информационной матрицы. Для решения задачи (5) будем использовать градиентный метод. Компоненты вектора градиента имеют вид

$$\frac{\partial \Psi[M(\xi)]}{\partial p_j} = d(x_j, \xi) = x_j^T M(\xi)^{-1} x_j = \text{tr} M(\xi)^{-1} x_j x_j^T, \quad (6)$$

где $d(x_j, \xi)$ – дисперсия оценки математического ожидания отклика в точке x_j .

В точках D -оптимального плана ξ^* значения $d(x_j, \xi^*)$ равны s , где s – число параметров модели [29]. При этом для точек, не попавших в план, выполняется условие

$$d(x_i, \xi^*) \leq \frac{1}{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} d(x_j, \xi^*) = s, \quad i = n_A + 1, \dots, n. \quad (7)$$

Если некоторый план ξ не является D -оптимальным, то ситуация обратная:

$$d(x_i, \xi) > s, \quad i = n_A + 1, \dots, n. \quad (8)$$

Таким образом, для разбиения X на X_A , X_B достаточно решить задачу построения D -оптимального плана ξ^* с n_A точками из X . Для ее решения в работах [30, 31] предложена последовательная схема.

3. Нечеткие регрессионные модели

Нечеткие модели Такаги – Сугено типа MISO (multiple input, single output) собраны из правил вида [1]:

$$\text{IF } x_1 \in A_{1i} \& \dots \& x_k \in A_{ki} \text{ THEN } y = \eta^i(x), \quad i = 1, \dots, M, \quad (9)$$

где A_{ji} – нечеткое подмножество для переменной x_j , определяемое функцией принадлежности $\mu_{A_{ji}}(x_j)$; $\eta^i(x)$ – локальная зависимость отклика y от набора факторов $x = (x_1, \dots, x_k)^T$, M – число правил.

Четкое значение переменной $\hat{y}$, полученное с использованием дефазификации по методу центра тяжести, вычисляется по формуле

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_i \eta^i}{\sum_{i=1}^M \mu_i}; \quad \mu_i = \prod_{j=1}^k \mu_{A_{ji}}(x_j). \quad (10)$$

Рассмотрим технику построения нечеткой регрессионной модели для случая построения одномерной зависимости. Система правил (9) в этом случае наиболее простая:

$$\text{IF } x \in A_i \text{ THEN } y = \eta^i(x), \quad i = 1, \dots, M, \quad (11)$$

где A_i имеют функцию принадлежности $\mu_{A_i}(x)$.

В случае использования так называемой модели синглтона $\eta^i(x)$ имеют вид $\eta^i(x) = \theta_0^i$, $i = 1, \dots, M$. При рассмотрении локальной линейной зависимости отклика от фактора соответствующие функции имеют вид $\eta^i(x) = \theta_0^i + \theta_1^i x$, $i = 1, \dots, M$. Итоговое уравнение наблюдения:

$$y_u = \sum_{i=1}^M (\theta_0^i + \theta_1^i x_u) \mu_{A_i}(x_u) + e_u, \quad u = 1, \dots, N. \quad (12)$$

Для более сложных вариантов локальных моделей $\eta^i(x)$ уравнение наблюдений (12) легко выписывается.

Результаты

Разбиение выборки на обучающую и тестовую части, как мы уже отмечали, можно использовать для отбора нечетких регрессионных моделей с целью получения решения с хорошей обобщающей способностью. Вычислительный эксперимент проводили с целью исследования возможности определения модели оптимальной сложности, ориентируясь на критерий стабильности. При этом разбиение выборки на тестовую и обучающую осуществляли с помощью D -оптимального планирования. Качество получаемых моделей оценивали по среднеквадратичной ошибке MSE.

В качестве модели, порождающей данные, использовалась оптимальной сложности модель:

$$\begin{cases} \text{if } (x \in A_1) \text{ then } \eta^1 = 4 - 8x, \\ \text{if } (x \in A_2) \text{ then } \eta^2 = 4 + 8x, \end{cases}$$

где A_j – нечеткое подмножество для переменной x , заданной на отрезке $[-1; 1]$ с функцией принадлежности $\mu_{A_j}(x)$, $j = 1, 2$ трапецевидного типа:

$$\mu_{A_1} = \begin{cases} 1; & a \leq x \leq c, \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}; & c < x < d, \\ 0; & d \leq x \leq b, \end{cases}$$

$$\mu_{A_2} = \begin{cases} 0; & a \leq x \leq c, \\ \frac{x-c}{d-c}; & c < x < d, \\ 1; & d \leq x \leq b, \end{cases}$$

где $d - c$ – ширина зоны пересечения.

В качестве помехи использовались нормально распределенные величины. Уровень помехи (дисперсия случайной величины) выбирался как 8 % от мощности незашумленного сигнала. Количество наблюдений выбиралось равным 50. Число подобластей, на которое разбивался весь интервал варьирования входного фактора, варьировался от 1 до 4, s – число параметров в TS модели. При этом использовались трапецевидные функции принадлежности.

Общая сложность нечеткой регрессионной модели при подборе оптимального ее варианта варьировалась от 1 до 12. При этом в качестве локальных моделей рассматривались модели типа синглтон, линейная и квадратичная. Описание моделей дано в табл. 1.

Виды тестируемых моделей

Общая сложность, s	Число партий	Вид локальной модели
1	1	синглтон
2	1	линейная
2'	2	синглтон
3	1	квадратичная
3'	1	синглтон
4	1	синглтон
4'	2	линейная
6	2	квадратичная
6'	3	линейная
8	4	линейная
9	3	квадратичная
12	4	квадратичная

На рис. 1 и в табл. 2 приведены результаты вычислительного эксперимента при использовании критерия стабильности.

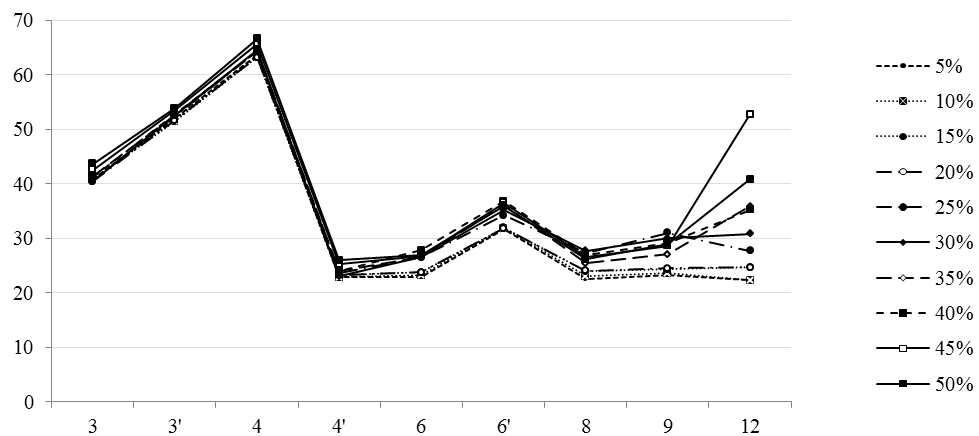


Рис. 1. График значений критерия стабильности

Обсуждение

Из результатов вычислительного эксперимента видно, что минимум критерия стабильности приходится на линейную TS модель с двумя партициями ($s = 4$). На этой же модели критерий MSE достигает своего минимального значения. Данная модель соответствует структуре реальной модели, которая использовалась при генерации данных. Также нужно отметить, что характер зависимости критерия стабильности от сложности модели практически не изменяется при варьировании объема тестовой части выборки. Однако при малом объеме тестовой части выборки критерий стабильности становится малочувствительным к эффекту переобучения модели.

Заключение

В работе проведено исследование структурной оптимизации нечетких регрессионных TS моделей.

Таблица 2

Значение критерия стабильности и MSE для моделей различной сложности s

s	MSE	Критерий стабильности									
		Число наблюдений в тестовой части									
		5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
1	6,4762	307,1192	306,8256	305,7256	306,0433	306,5980	307,2043	308,6855	306,9926	306,3849	306,0475
2	6,4782	307,1689	306,9754	305,6282	305,9656	308,3569	307,1291	308,7896	307,2485	307,7708	306,3891
2'	6,4526	306,4974	306,3450	305,0525	305,3872	306,5835	306,4619	308,0793	306,5101	306,7782	306,0983
3	0,5535	40,9518	40,9593	40,8591	40,4844	40,4895	40,6115	41,4996	41,3210	42,6162	43,7416
3'	0,6251	52,0385	51,4656	51,8396	51,7098	52,5571	52,6314	52,6026	52,8370	53,6215	53,8866
4	0,9846	63,6888	63,3663	63,2859	63,2524	64,3173	64,5728	64,4777	64,4488	65,7341	66,6214
4'	0,0575	22,9393	22,8787	23,2689	23,1987	23,5807	23,1033	23,9348	23,9989	25,2191	25,9789
6	0,0655	22,9306	23,2113	23,7749	23,7462	26,5574	26,5390	26,5287	27,7713	26,8364	26,9084
6'	0,2547	31,7920	31,8077	31,9111	31,8555	34,2185	35,2054	36,1829	36,8296	36,5456	35,9863
8	0,0806	22,5166	23,0422	23,9404	24,0652	27,3042	27,7000	25,4158	26,9291	26,4823	26,1358
9	0,0731	23,1954	23,5621	24,3333	24,5474	31,0681	30,0397	27,0592	29,1085	28,5924	28,9619
12	0,1175	22,4231	22,2774	24,7241	24,7171	27,7237	30,8344	35,9195	35,2667	52,7893	40,8159

По результатам исследования предлагается выбирать оптимальную структуру на основе критерия стабильности, которая представляет собой ошибку прогноза на тестовой и обучающей части выборки. Для повышения надежности работы данной процедуры разделение выборки на обучающую и тестовую части осуществлялось с помощью *D*-оптимального планирования эксперимента. Для построения обучающей выборки в виде *D*-оптимального плана предложено пользоваться эффективной процедурой последовательного наращивания спектра плана.

Библиографический список

1. **Takagi, T.** Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15, № 1, P. 116–132.
2. **Babuska, R.** Fuzzy Modelling for Control / R. Babuska. – London ; Boston : Kluwer Academic Publishers, 1998. – 257 p.
3. **Lilly, J. H.** Fuzzy Control and Identification / John H. Lilly. – New Jersey : Wiley, 2010. – 231 p.
4. **Попов, А. А.** Регрессионное моделирование на основе нечетких правил / А. А. Попов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2000. – № 2 (19). – С. 49–57.
5. **Kosko, B.** Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko // IEEE Transactions on Computers. – 1994. – Vol. 43, № 11. – P. 1329–1333.
6. **Попов, А. А.** Modeling volatility of time series using fuzzy GARCH models / А. А. Попов, К. В. Быханов // Proceedings – 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005 sponsors: Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 2005. – P. 687–692.
7. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление : пер. с англ. / А. Пегат. – 2-е изд. – М., 2013. – 798 с.
8. **Попов, А. А.** Построение деревьев решений для прогнозирования количественного признака на классе логических функций от лингвистических переменных / А. А. Попов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 3 (36). – С. 77–86.
9. **Попов, А. А.** Конструирование дискретных и непрерывно-дискретных моделей регрессионного типа / А. А. Попов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 1996. – № 1. – С. 21–30.
10. **Попов, А. А.** Анализ линейных моделей мягкого дисперсионного анализа / А. А. Попов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1 (31). – С. 85–90.
11. **Попов, А. А.** Идентифицируемость моделей мягкого дисперсионного анализа / А. А. Попов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1 (31). – С. 79–84.
12. **Попов, А. А.** Оптимальное планирование эксперимента в задачах структурной и параметрической идентификации моделей многофакторных систем / А. А. Попов. – Новосибирск, 2013. – 296 с.
13. **Bang-Yong Sohn.** Robust fuzzy linear regression based on M-estimators / Bang-Yong Sohn // J. Appl. Math. & Computing. – 2005. – Vol. 18, № 1-2. – P. 591–601.
14. **Попов, А. А.** Построение регрессионных зависимостей с использованием алгоритма опорных векторов с адаптивными функциями потерь / А. А. Попов, С. А. Саутин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (42). – С. 17–26.

15. **Попов, А. А.** Использование робастных функций потерь в алгоритме опорных векторов при решении задачи построения регрессии / А. А. Попов, А. С. Саутин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 4 (37). – С. 45–56.
16. **Гульятеева, Т. А.** Методы статистического обучения в задачах регрессии и классификации : монография / Т. А. Гульятеева, А. А. Попов, А. С. Саутин. – Новосибирск, 2016. – 322 с.
17. **Перельман, И. И.** Методология выбора структуры модели при идентификации объектов / И. И. Перельман // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 11. – С. 5–29.
18. **Степашко, В. С.** Методы и критерии решения задач структурной идентификации / В. С. Степашко, Ю. Л. Кочерга // Автоматика. – 1985. – № 5. – С. 29–37.
19. **Кочерга, Ю. Л.** J-оптимальная редукция структуры модели в схеме Гаусса – Маркова / Ю. Л. Кочерга // Автоматика. – 1988. – № 4. – С. 34–38.
20. **Сарычев, А. П.** Усредненный критерий регулярности метода группового учета аргументов в задаче поиска наилучшей регрессии / А. П. Сарычев // Автоматика. – 1990. – № 5. – С. 28–33.
21. **Степашко, В. С.** Асимптотические свойства внешних критериев выбора моделей / В. С. Степашко // Автоматика. – 1988. – № 6. – С. 75–82.
22. **Попов, А. А.** Использование повторных выборок в критериях селекции моделей. Планирование эксперимента, идентификация, анализ и оптимизация многофакторных систем / А. А. Попов ; Новосибирск. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1990. – С. 82–88.
23. **Лисицин, Д. В.** Исследование критериев селекции многооткликовых регрессионных моделей / Д. В. Лисицин // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 1996. – № 2. – С. 19–28.
24. **Лисицин, Д. В.** Конструирование критериев селекции многомерных регрессионных моделей / Д. В. Лисицин // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 1996. – № 1. – С. 13–20.
25. **Попов, А. А.** Планирование эксперимента в задачах структурного моделирования с использованием критерия скользящего прогноза / А. А. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1996. – Т. 62, № 10. – С. 42–44.
26. **Попов, А. А.** Разбиение выборки для внешних критериев селекции моделей с использованием методов планирования экспериментов / А. А. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1997. – Т. 63, № 1. – С. 49–53.
27. **Попов, А. А.** Получение тестовой выборки в методе LS–SVM с использованием оптимального планирования эксперимента / А. А. Попов, Ш. А. Бобоев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 4. – С. 80–99.
28. **Юрачковский, Ю. П.** Применение канонической формы внешних критериев для исследования их свойств / Ю. П. Юрачковский, А. Н. Грошков // Автоматика. – 1979. – № 3. – С. 85–89.
29. **Федоров, В. В.** Активные регрессионные эксперименты. Математические методы планирования эксперимента / В. В. Федоров. – Новосибирск : Наука. 1981. – С. 19–73.
30. **Попов, А. А.** Последовательные схемы построения оптимальных планов эксперимента / А. А. Попов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 1995. – № 1. – С. 39–44.
31. **Попов, А. А.** Последовательные схемы синтеза оптимальных планов эксперимента / А. А. Попов // Доклады Академии наук высшей школы России. – 2008. – № 1 (10). – С. 45–55.

References

1. Takagi T., Sugeno M. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
2. Babuska R. *Fuzzy Modelling for Control*. London; Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998, 257 p.
3. Lilly J. H. *Fuzzy Control and Identification*. New Jersey: Wiley, 2010, 231 p.
4. Popov A. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 2000, no. 2 (19), pp. 49–57.
5. Kosko B. *IEEE Transactions on Computers*. 1994, vol. 43, no. 11, pp. 1329–1333.
6. Popov A. A., Bykhanov K. V. *Proceedings – 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005 sponsors: Novosibirsk State Technical University*. Novosibirsk, 2005, pp. 687–692.
7. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie: per. s angl.* [Fuzzy modeling and control: translated from english]. 2nd ed. Moscow, 2013, 798 p.
8. Popov A. A. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific bulletin of Novosibirsk State Technical University]. 2009, no. 3 (36), pp. 77–86.
9. Popov A. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 1996, no. 1, pp. 21–30.
10. Popov A. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 2003, no. 1 (31), pp. 85–90.
11. Popov A. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 2003, no. 1 (31), pp. 79–84.
12. Popov A. A. *Optimal'noe planirovanie eksperimenta v zadachakh strukturnoy i parametricheskoy identifikatsii modeley mnogofaktornykh sistem* [Optimal experimental design in the tasks of structural and parametric identification of multifactor systems models]. Novosibirsk, 2013, 296 p.
13. Bang-Yong Sohn. *J. Appl. Math. & Computing*. 2005, vol. 18, no. 1-2, pp. 591–601.
14. Popov A. A., Sautin S. A. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific bulletin of Novosibirsk State Technical University]. 2011, no. 1 (42), pp. 17–26.
15. Popov A. A., Sautin A. S. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific bulletin of Novosibirsk State Technical University]. 2009, no. 4 (37), pp. 45–56.
16. Gul'tyaeva T. A., Popov A. A., Sautin A. S. *Metody statisticheskogo obucheniya v zadachakh regressii i klassifikatsii: monografiya* [Methods of statistical training in regression and classification problems: monograph]. Novosibirsk, 2016, 322 p.
17. Perel'man I. I. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics]. 1983, no. 11, pp. 5–29.
18. Stepashko V. S., Kocherga Yu. L. *Avtomatika* [Automation]. 1985, no. 5, pp. 29–37.
19. Kocherga Yu. L. *Avtomatika* [Automation]. 1988, no. 4, pp. 34–38.
20. Sarychev A. P. *Avtomatika* [Automation]. 1990, no. 5, pp. 28–33.
21. Stepashko V. S. *Avtomatika* [Automation]. 1988, no. 6, pp. 75–82.
22. Popov A. A. *Ispol'zovanie povtornykh vyborok v kriteriyakh selektsii modeley. Planirovanie eksperimenta, identifikatsiya, analiz i optimizatsiya mnogofaktornykh sistem* [The use of repeated samples in the criteria for the selection of models. Experiment planning, identification, analysis and optimization of multifactor systems]. Novosibirsk. elektrotekhn. in-t. Novosibirsk, 1990, pp. 82–88.

23. Lisitsin D. V. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 1996, no. 2, pp. 19–28.
24. Lisitsin D. V. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 1996, no. 1, pp. 13–20.
25. Popov A. A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of materials]. 1996, vol. 62, no. 10, pp. 42–44.
26. Popov A. A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Diagnostics of materials]. 1997, vol. 63, no. 1, pp. 49–53.
27. Popov A. A., Boboev Sh. A. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific bulletin of Novosibirsk State Technical University]. 2016, no. 4, pp. 80–99.
28. Yurachkovskiy Yu. P., Groshkov A. N. *Avtomatika* [Automation]. 1979, no. 3, pp. 85–89.
29. Fedorov V. V. *Aktivnye regressionnye eksperimenty. Matematicheskie metody planirovaniya eksperimenta* [Active regression experiments. Mathematical methods for experiment planning]. Novosibirsk: Nauka. 1981, pp. 19–73.
30. Popov A. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Novosibirsk State Technical University]. 1995, no. 1, pp. 39–44.
31. Popov A. A. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossii* [Reports of the Academy of Sciences of Higher School of Russia]. 2008, no. 1 (10), pp. 45–55.

Попов Александр Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
информатики, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 20)

E-mail: a.popov@corp.nstu.ru

Холдонов Абдурахмон Абдуллоевич

аспирант, Новосибирский
государственный технический
университет (Россия, г. Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 20)

E-mail: firuz_530_11_29@mail.ru

Popov Aleksandr Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied
informatics, Novosibirsk State Technical
University (20 Karla Marksa avenue,
Novosibirsk, Russia)

Kholdonov Abdurakhmon Abdulloevich

Postgraduate student, Novosibirsk State
Technical University (20 Karla
Marksa avenue, Novosibirsk, Russia)

УДК 519.23

Попов, А. А.

Структурная оптимизация нечетких регрессионных моделей с минимизацией ошибки прогноза на обучающей и тестовой выборке /
А. А. Попов, А. А. Холдонов // Известия высших учебных заведений.
Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 5–17. –
DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-1.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются быстропеременные процессы, протекающие в различных системах диагностики и мониторинга. Предметом исследования является алгоритм, построенный на нейронных сетях, призванный упростить процедуру адаптации экстремальной фильтрации к режиму реально времени. Цель работы состоит в создании и исследовании алгоритма, реализующего экстремальную фильтрацию с помощью нейронных сетей, и его адаптации к работе в режиме реального времени.

Материалы и методы. Исследования алгоритма проводились в среде *Matlab* и *Simulink*. Было проведено моделирование работы алгоритма на выборках сигнала, поступающего в режиме реального времени.

Результаты. Обоснована возможность применения нейронных сетей для реализации алгоритма экстремальной фильтрации. В среде *Matlab* и *Simulink* создана программа, реализующая алгоритм экстремальной фильтрации на нейронных сетях. Проведено тестирование работы предлагаемого алгоритма на выборках реального сигнала и выполнено сравнение предлагаемого алгоритма с аналогами. Показан способ адаптации предлагаемого алгоритма к режиму реального времени с помощью метода покадровой обработки сигнала.

Выводы. Использование алгоритма выделения составляющих, построенного на нейронных сетях, позволяет успешно выделять составляющие сигнала, для которых могут быть вычислены параметры, позволяющие судить о происходящих в системе изменениях. Адаптация к режиму реального времени алгоритма выделения составляющих, построенного на нейронных сетях, с помощью метода покадровой обработки сигнала дает возможность выделять все составляющие сигнала в режиме реального времени. Таким образом, алгоритм выделения составляющих, построенный на нейронных сетях, в сочетании с методом покадровой обработки сигнала позволяет успешно решать задачу диагностики, контроля и мониторинга состояния систем, работающих в режиме реального времени.

Ключевые слова: реальное время, объект, нейронная сеть, экстремальная фильтрация, метод покадровой обработки сигнала

А. А. Priymak

THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR ISOLATION OF COMPONENTS IN REAL TIME

Abstract.

Background. The object of the study are fast-changing processes occurring in various systems of diagnosis and monitoring. The subject of the study is an algo-

rithm based on neural networks designed to simplify the procedure of adaptation of extreme filtering to the real-time mode. The purpose of the work is to create and study an algorithm that implements extreme filtering using neural networks, and its adaptation to work in real time.

Materials and methods. The algorithm was studied in Matlab and Simulink. The simulation of the algorithm operation was carried out on the samples of the signal received in real time.

Results. The possibility of using neural networks for the implementation of the algorithm of extreme filtering is substantiated. In Matlab and Simulink environment the program implementing the algorithm of extreme filtering on neural networks is created. The proposed algorithm was tested on samples of a real signal and the proposed algorithm is compared with analogues. The method of adaptation of the proposed algorithm to the real-time mode using the frame by frame method is shown.

Conclusions. The use of the algorithm of decomposition built on neural networks, allows you to successfully allocate the components of the signal, for which parameters can be calculated, allowing to judge the changes taking place in the system. Adaptation to the real - time mode of the algorithm of decomposition signal, built on neural networks, using the method of frame by frame, makes it possible to allocate all the components of the signal in real time. Thus, the algorithm of decomposition signal, built on neural networks, in combination with the method of frame by frame, can successfully solve the problem of diagnosis, monitoring of the state of systems operating in real time.

Key words: real-time, objects, neural networks, extreme filtering, frame-by-frame processing method.

Введение

В различных сферах промышленности используется большое количество объектов, работающих непрерывно. Для диагностики, контроля и мониторинга их состояния необходимо отслеживать быстропеременные процессы (БПП), протекающие в данных объектах. К БПП относят параметры пульсации давления, вибрации и акустики.

Для удобства отслеживания изменений, происходящих в объектах, вызванных протекающими в них БПП, с помощью специальных алгоритмов обработки из сигнала выделяют субполосные составляющие (моды), по которым удобно анализировать и классифицировать протекающие в объекте изменения.

В случае непрерывной работы систем данные алгоритмы адаптируют к режиму реального времени с помощью методов адаптации. Разработка и совершенствование методов адаптации и самих адаптируемых алгоритмов выделения информативных составляющих является важной задачей для диагностики, контроля и мониторинга состояния объектов.

1. Выделение составляющих в режиме реального времени

Примером алгоритма, способного решать задачи диагностики, контроля и мониторинга в реальном времени, является алгоритм разложения сигнала сложной формы на моды, описываемый в работе [1]. В первоначальном варианте метод реализовывался по классической для цифровой обработки сигналов схеме: на вход подавался массив значений, а на выходе получали моды, которые последовательно извлекались сначала из сигнала, а затем из сглаженных составляющих.

Алгоритм основан на анализе экстремумов процесса и заключается в последовательном выделении самой высокочастотной составляющей [2]:

$$x_{pi} = -25x_{yi-1} + 0,5x_{yi} - 0,25x_{yi+1} \quad (1)$$

при одновременном вычислении сглаженной составляющей x_{ci} , уже не содержащей x_{pi} :

$$x_{ci} = 0,25x_{yi-1} + 0,5x_{yi} + 0,25x_{yi+1}. \quad (2)$$

В дальнейшем из сглаженной составляющей x_{ci} , вычисленной на предыдущем шаге, извлекается следующая высокочастотная составляющая x_{pi+1} и производится ее сглаживание x_{ci+1} [2].

Экстремумы сигнала несут информацию о самой высокочастотной узкополосной составляющей. Удалением (фильтрацией) из сигнала этой составляющей может быть получена сглаженная кривая, экстремумы которой несут информацию о следующей узкополосной составляющей. Данная итерационная процедура может повторяться до тех пор, пока не будет получена последовательность со знакопеременными экстремумами, являющаяся самой низкочастотной узкополосной составляющей [2].

Параметры разложения – частота f_{ij} и амплитуда A_{ij} (или мощность σ_{ij}^2) составляющих, $j=1...K$, характеризуют модель объекта порядка K в текущий момент времени t_i .

Ранее алгоритм экстремальной фильтрации предлагалось адаптировать для систем реального времени при помощи метода с подгрузкой сигнала и метода покадровой обработки [2]. Такой подход позволяет решить задачу, но существенно усложняет сам алгоритм, так как возникает задача одновременного формирования нескольких слоев.

Развитием предложенного подхода является алгоритм выделения составляющих, основанный на использовании нейронных сетей.

2. Выделение составляющих сигнала с использованием нейронных сетей

Нейронная сеть – это большой параллельный распределенный процессор, состоящий из нейронов – элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные значения и предоставляющих их для последующей обработки, определение дается в работе [3].

Применение нейронных сетей для выделения составляющих из сигнала вызвано их универсальностью. При разработке, отладке и моделировании работы алгоритмов, использующих нейронные сети, не возникает трудностей с изменением каких-либо параметров, влияющих на проводимые вычисления.

Существует несколько фундаментальных архитектур нейронных сетей. Базовой архитектурой является многослойная нейронная сеть.

В качестве используемых для построения алгоритма нейронных сетей целесообразно использовать или радиально-базисную нейронную сеть или многослойную однонаправленную нейронную сеть. В языке среды Matlab многослойная однонаправленная нейронная сеть создается с помощью функ-

ции *newff*, а радиально-базисная нейронная сеть – с помощью функции *newrbe*.

Были выбраны точные радиально-базисные нейронные сети в связи с их особенностями и преимуществами. Их структура имеет нулевую ошибку, а в качестве функций активации используются радиально-базисные функции.

Преимуществами нейронных сетей данного типа является автоматическое формирование структуры, отсутствие патологической сходимости и простота устройства архитектуры.

Структура радиально-базисной нейронной сети показана на рис. 1. Также вопросы практического использования алгоритмов, построенных с использованием нейронных сетей, подробно освещены в работе [4]

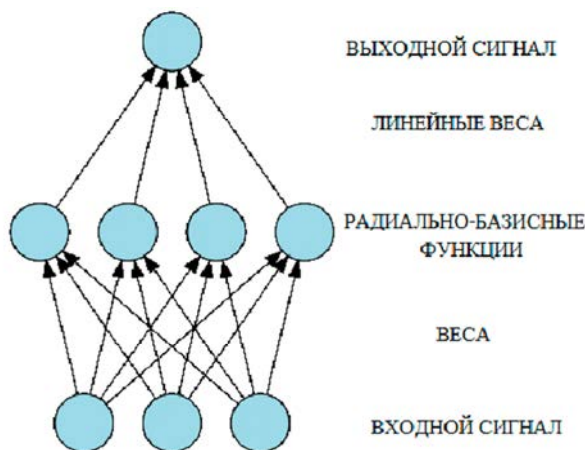


Рис. 1. Радиально-базисная нейронная сеть

По умолчанию сеть, созданная с помощью функции *newrbe*, состоит из трех слоев – первый слой является входным, второй скрытым, а третий выходным. Такой вариант нейронной сети и был выбран для реализации алгоритма выделения составляющих сигнала.

Для работы нейронных сетей любого типа необходимо провести их обучение. Оно заключается в сравнении выхода конечного слоя нейронов с образцом обучения, из разницы между желаемым и реальным делается вывод о характеристиках связей между нейронами последнего слоя и слоя предыдущего. В дальнейшем такая операция выполняется уже с нейронами предпоследнего слоя и т.д. Результатом реализации описанного алгоритма является таблица изменений весов связей, формируемая от выхода к входу.

Один из возможных способов обучения нейронной сети выделению составляющих (при наличии участка сигнала с уже выделенными составляющими) заключается в том, что образцом обучения задаются данные составляющие, а входом задается сигнал. Получается нейронная сеть, имеющая несколько выходов, число которых соответствует числу выделяемых составляющих. Однако такой подход имеет недостатки, связанные с тем, что необходимо либо иметь четкое представление о количестве выделяемых составляющих, либо использовать нейронную сеть с изменяемым количеством выходов.

Существует более гибкий и универсальный метод выделения составляющих с помощью нейронных сетей, реализуемый в виде цепочки.

Для выделения всех составляющих сигнала с помощью нейронных сетей необходимо последовательно соединить несколько нейронных сетей так, чтобы выделенная первой сетью сглаженная составляющая поступала на вход второй сети. Вторая нейронная сеть из полученной от первой сети сглаженной составляющей выделяла бы следующую знакопеременную и сглаженную составляющие и т.д.

Условием окончания выделения знакопеременных и сглаженных составляющих является их равенство, которое означает, что выделена самая низкочастотная составляющая сигнала.

Для построения алгоритма выделения составляющих сигнал, необходимо два типа сетей – сети, обученные выделять знакопеременные составляющие, и сети, обученные выделять сглаженные составляющие.

Для обучения нейронной сети выделению высокочастотных (знакопеременных) составляющих в качестве входа задаются тренировочные последовательности точек сигнала, а в качестве образца выделенные методами экстремальной фильтрации (1) или методом эмпирических мод – Empirical Mode Decomposition (EMD), знакопеременные составляющие. Обучение нейронной сети выделению сглаженных составляющих производится аналогичным образом, только в качестве образца подаются сглаженные составляющие (2).

Структура, реализующая алгоритм выделения составляющих с использованием нейронных сетей для сигнала, содержащего три составляющих, имеет вид цепочки из нейронных сетей. Она представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структура, реализующая выделения составляющих с помощью нейронных сетей

В дальнейшем для выделения знакопеременных и сглаженных составляющих не требуется проводить повторное обучение сетей, нейронную сеть достаточно обучить один раз, после чего только выполнять загрузку результатов обучения.

3. Тестирование работы алгоритма на массивах данных

Для тестирования работы алгоритма, выделяющего составляющие, использующего нейронные сети, и проверки достоверности его результатов был

взяты ряд сигналов, каждый состоящий не менее чем из двух составляющих. С помощью метода экстремальной фильтрации для каждого из ряда сигналов были найдены знакопеременные и сглаженные составляющие.

Пример последовательного выделения всех знакопеременных составляющих одного из сигналов показан на рис. 3. На первом графике (синим) показан сам сигнал. На втором графике (красным) показана первая, выделенная с помощью алгоритма, знакопеременная составляющая, которая на всем протяжении совпадает с известной. На третьем графике (синим) представлена, выделенная алгоритмом, сглаженная составляющая. На четвертом (красным) приведена, выделенная с помощью алгоритма, вторая знакопеременная составляющая, которая также полностью совпадает с известной.

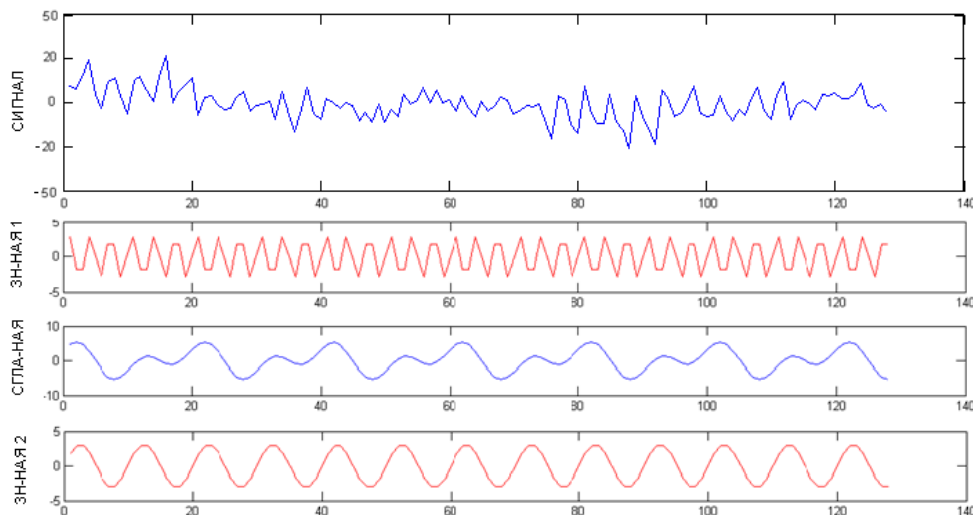


Рис. 3. Пример выделения знакопеременных составляющих

Тестирование работы алгоритма показало совпадение выделенных с помощью алгоритма знакопеременных составляющих с известными, что доказывает работоспособность данного алгоритма.

4. Сравнение алгоритма, построенного на нейронных сетях, с аналогами по вычислительной трудоемкости и точности

Быстродействие имеет большое значение в обработке цифровых сигналов и часто именно этот параметр является ключевым при выборе того или иного метода.

Наиболее простым является сравнение по быстродействию алгоритма, построенного на нейронных сетях с классическим алгоритмом экстремальной фильтрации на конечной выборке сигнала (не в режиме реального времени). Данные алгоритмы одинаковы по цели и структуре, поэтому их сравнение является наиболее интересным. Быстродействия данных алгоритмов приведены в табл. 1.

Измерения быстродействия этих двух алгоритмов были выполнены путем снятия процессорного времени. Моделирование работы методов проведено на идентичных выборках сигналов, равной длины (300 точек).

Таблица 1

Сравнение методов (не реальное время)

Метод	Длина выборки	Трудоемкость, мс
Алгоритм, построенный на нейронных сетях	300	0,0156
Экстремальная фильтрация		0,0312

Видно, что алгоритм экстремальной фильтрации имеет меньшее быстродействие по сравнению с алгоритмом, построенным на нейронных сетях. Другим преимуществом последнего является более простая структура и более высокая точность (при обучении на большом количестве выборок сигнала).

Также важно провести сравнение алгоритма, построенного на нейронных сетях, с алгоритмом параллельного выделения составляющих с подгрузкой значений [5] на сигнале, поступающем в режиме реального времени.

Алгоритм, построенный на нейронных сетях, адаптируется к режиму реального времени с помощью метода покадровой обработки, при этом важно выбрать размер буфера. Необходимо, чтобы длина буфера совпадала с длиной выборок, на которых проводится обучение нейронных сетей выделению составляющих.

Из сравнения, приведенного в табл. 2, также можно сделать вывод, что алгоритм, построенный на нейронных сетях, обладает большим быстродействием, чем алгоритм параллельного выделения составляющих с подгрузкой сигнала. Это связано с тем, что алгоритм, построенный на нейронных сетях, имеет большее быстродействие по сравнению с классическим алгоритмом экстремальной фильтрации.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов по трудоемкости (реальное время)

Метод	Длина выборки	Трудоемкость, мс
Алгоритм, построенный на нейронных сетях	300	0.0200
Алгоритм параллельного выделения составляющих		0.0312

Таким образом, алгоритм, построенный на нейронных сетях, выигрышнее как по быстродействию, так и по точности и простоте. Он может находить широкое применение в различных системах, где требуются данные качества.

Кроме того, отметим, что, хотя, как видно из таблиц, алгоритм параллельного выделения составляющих не дает существенного преимущества в трудоемкости, он более приемлем, например, для систем мониторинга. Это обусловлено тем, что в алгоритме экстремальной фильтрации обработка начинается после накопления массива значений, а во втором – во время накопления данных, т.е. результат появляется раньше на $T = \Delta t \cdot N$, где Δt – шаг дискретизации, а N – длина выборки.

5. Адаптация алгоритма, построенного на нейронных сетях, к режиму реального времени

Ранее для адаптации экстремальной фильтрации к работе в режиме реального времени был предложен метод с подгрузкой значений и метод покадровой обработки, описанный в работе [2].

Для адаптации алгоритма выделения составляющих, построенного на нейронных сетях, целесообразно использовать последний, так как нейронная сеть работает с выборками данных определенной длины.

Работу системы, обеспечивающую покадровую обработку сигнала, можно разделить на две части – накопление поступающей информации и ее обработку. Исходя из этого принцип работы метода покадровой выделения составляющих можно сформулировать следующим образом: непрерывно поступающий сигнал x_j , $j = 1, 2, \dots, N$, накапливается в буфере (массив накопления) заданного размера s , необходимом для обеспечения беспропускной выделения составляющих. При заполнении этого буфера информация из него поступает в обработку, а сам буфер освобождается для приема новой последовательности значений. Пока идет обработка сигнала с использованием нейронных сетей – производится поиск знакопеременных и сглаженных составляющих, буфер продолжает наполняться новыми значениями. Такие итерационные процедуры могут повторяться бесконечно, до тех пор, пока не прекратится поступление сигнала.

При адаптации алгоритма, построенного на нейронных сетях, к режиму реального времени с помощью метода покадровой обработки важно, чтобы длина буфера и длина выборок, на которых проводится обучение нейронных сетей выделению составляющих, были равны.

Также в методе адаптации с подгрузкой сигнала существует условие работоспособности, согласно которому время, затрачиваемое на обработку значений $t_{обр}$, не должно превышать время, затрачиваемое на их накопление $t_{коп}$, $t_{обр} < t_{коп}$. При моделировании адаптации алгоритма, работающего на нейронных сетях, к режиму реального времени на сигнале длиной 300 точек это условие выполняется: $0,0156 < 0,0200$, при размере буфера 10 точек и шаге дискретизации $dt = 6,6667e^{-05}$. Следовательно, метод адаптации с помощью покадровой обработки подходит для адаптации алгоритма выделения составляющих, построенного на нейронных сетях, к режиму реального времени.

В случаях, когда условие не выполняется и $t_{обр} > t_{коп}$, существует возможность уменьшения времени обработки $t_{обр}$ за счет разбиения буфера на части равной длины и их обработки. Эта возможность подробно описана в работе [2].

Заключение

Использование алгоритмов выделения составляющих, построенных на нейронных сетях, позволяет успешно выделять составляющие сигнала, для которых могут быть вычислены параметры, позволяющие судить о происходящих в объекте изменениях.

Адаптация к режиму реального времени алгоритма выделения составляющих, построенного на нейронных сетях, с помощью метода покадровой обработки сигнала дает возможность выделять все составляющие сигнала в режиме реального времени.

Таким образом, алгоритм выделения составляющих, построенный на нейронных сетях, в сочетании с методом покадровой обработки сигнала позволяет успешно решать задачу диагностики, контроля и мониторинга состояния объектов, работающих в режиме реального времени.

Библиографический список

1. **Мясникова, Н. В.** Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин. – М. : Физматлит, 2016. – 184 с.
2. **Приймак, А. А.** Адаптация метода экстремальной фильтрации для систем реального времени с помощью покадровой обработки сигнала / А. А. Приймак // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – С. 2–10. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4175.
3. **Кричевский, М. Л.** Методы исследований в менеджменте : учеб. пособие / М. Л. Кричевский. – М. : КноРус, 2016. – 296 с.
4. **Зенов, А. Ю.** Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра / А. Ю. Зенов, Н. В. Мясникова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 3–7.
5. **Приймак, А. А.** Алгоритм разложения сигнала сложной формы на моды на основе экстремальной фильтрации для систем реального времени / А. А. Приймак // Современные технологии в задачах управления автоматикой и обработки информации : сб. тр. XXV Междунар. науч.-технич. конф. – М., 2016.

References

1. Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Tsypin B. V. *Ekspress-analiz signalov v inzhenernykh zadachakh* [Express analysis of signals in engineering tasks]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 184 p.
2. Priymak A. A. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don]. 2017, no. 2, pp. 2–10. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4175.
3. Krichevskiy M. L. *Metody issledovaniy v menedzhmente: ucheb. posobie* [Research methods in management: teaching aids]. Moscow : KnoRus, 2016, 296 p.
4. Zenov A. Yu., Myasnikova N. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 3 (23), pp. 3–7.
5. Priymak, A. A. *Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii: sb. tr. XXV Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* [Modern technologies in the management of automation and information processing: proceedings of XXV International scientific and engineering conference]. Moscow, 2016.

Приймак Антон Александрович
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

Priymak Anton Aleksandrovich
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

E-mail: chen-wei.yang@ltu.se

УДК 681.3.01

Приймак, А. А.

Использование нейронных сетей для выделения составляющих в режиме реального времени / А. А. Приймак // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 18–26. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-2.

МЕТОДИКА СБОРА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОРОТКИХ СООБЩЕНИЙ ИЗ СЕТИ ИНТЕРНЕТ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются короткие сообщения из общедоступных источников, таких как социальные сети, форумы, открытые SMS-сообщения, имеющие прикрепленные геоданные о положении пользователя в момент публикации сообщения. Предметом исследования является классификация коротких сообщений с помощью методов интеллектуального анализа данных и сравнительный анализ методов «ближайших соседей» и «наивного Байеса». Цель работы – разработка методологии интеллектуального анализа данных, позволяющая классифицировать сообщения без предварительного обучения системы. Проведена экспериментальная проверка разработанной методологии на наборе данных, полученных из социальных сетей, с целью выявления внештатных ситуаций в дорожно-транспортной инфраструктуре.

Материалы и методы. Исследования обработки коротких текстовых сообщений из общедоступных источников с целью классификации дорожных инцидентов выполнены посредством методов интеллектуального анализа данных. Наборы данных для экспериментальной системы взяты из тематических форумов, групп социальных сетей и новостных сайтов.

Результаты. Предложена методология на основе ансамбля методов интеллектуального анализа данных, позволяющая классифицировать короткие текстовые сообщения без предварительного обучения системы. Разработана компьютерная программа на основе предложенной методологии, классифицирующая данные из общедоступных источников и отображающая полученные сообщения с прикрепленными геоданными на карте г. Пензы.

Выводы. Сравнительный анализ двух методов обработки данных показал, что метод «ближайших соседей» позволяет достичь большей точности на тестируемом наборе данных по сравнению с методом «наивного Байеса». Также это подтверждает утверждения, что методы машинного обучения можно успешно применять для обработки коротких текстовых сообщений разного характера и в разных сферах. Наряду с этим было выявлено, что информация, получаемая из социальных сетей и SMS-сообщений, является ценной для определения реакции участников дорожного движения в режиме реального времени.

Ключевые слова: интеллектуальная обработка данных, Smart city, метод k-ближайших соседей, внештатная дорожная ситуация

¹ Результаты работы получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 18-07-00975.

© 2018 Ляпин А. М. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

METHOD FOR COLLECTION AND INTELLECTUAL ANALYSIS OF SHORT COMMUNICATIONS FROM THE INTERNET NETWORK FOR THE IDENTIFICATION OF EXTRA SITUATIONS IN ROAD TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Abstract.

Background. The subject of the study are short messages from public sources such as social networks, forums, public sms messages, with geodata about the status of the user at the time of publication of the messages. The subject of the study is the classification of short messages using methods of data mining and comparative analysis of the methods of "nearest neighbours" and "naive Bayes". The aim of the work is to develop a methodology for data mining, which allows you to classify messages without learning the system. Experimental verification of the developed methodology on the collection of data from social networks, with the aim of interfering with external work in the road and transport infrastructure.

Materials and methods. Research of the processing of short text messages from public sources for the purpose of classifying road incidents have been carried out using data mining techniques. Data sets for the experimental system are taken from thematic forums and groups of social networks and news sites.

Results. The methodology based on ensemble of methods of data mining, which allows to classify short text messages without preliminary training of the system. A computer program is developed on the basis of the proposed methodology, which classifies data from public sources and displays received messages with attached geodata on the map of Penza.

Conclusions. Comparative analysis of two data processing methods showed that the method of "nearest neighbors" allows to achieve greater accuracy on the test data set compared to the "naive Bayes" method. This also confirms the assertion that machine learning methods can be successfully applied to the processing of short text messages of a different nature and in different spheres. Along with this, it was revealed that information received from social networks and SMS messages is valuable for determining the reaction of road users in real time.

Key words: Data mining, Smart city, k-nearest neighbors, freelance road situation.

Введение

Технологии создания компонент интеллектуальной и безопасной городской среды «Smart & Save City» [1] активно развиваются и внедряются практически во все сферы жизнедеятельности человека, связанные со здоровьем, безопасностью, отдыхом, работой и транспортом. Для оценки и анализа проблем безопасности целесообразно использовать информацию, сгенерированную самими людьми в социальных сетях и медиапространстве сети Интернет. Именно здесь многочисленные информационные источники являются наиболее доступными, открытыми и актуальными.

В статье рассматривается предложенный подход для интеллектуального анализа данных из социальных сетей Twitter и «ВКонтакте». Twitter представляет собой сеть микроблогов, где пользователи обмениваются короткими сообщениями – твитами. В Twitter зарегистрировано более 600 млн пользова-

телей по всему миру, здесь ежедневно размещается примерно 65 млн твитов [1]. Сети «ВКонтакте» – социальная сеть российского Интернет-сегмента, крупнейшая в Европе. Среднесуточная аудитория составляет более 80 млн пользователей, а зарегистрировано более 450 млн [2].

Рассмотрим предложенный метод анализа сообщений на примере сообщений, связанных с безопасностью дорожного движения, которые имеют временные и геотегированные метки с информацией о координатах местоположения смартфона пользователя, отправившего сообщение, времени отправки. Сообщения, как правило, содержат информацию о дорожном инциденте или описание проблем с дорожно-транспортной инфраструктурой, результатом которых становятся пробки, изменения дорожного трафика, маршрутов движения и другие события.

Особенностью предлагаемой методологии является использование метода машинного обучения для классификации и кластеризации получаемых данных. В отличие от других подходов, в которых используются ручные классификаторы, процесс анализа полностью автоматизирован. Так как сообщения являются геотегированными и содержат сгенерированный пользователем контент с координатами и временем события, то результаты кластеризации визуализируются на цифровой картографической основе с целью определения текущего состояния дорожной обстановки и краткосрочного прогнозирования изменения ситуации в некоторой области рядом с инцидентом. Это позволит наглядно представить критические области, причину и оценить масштабность происшествия.

1. Метод классификации событий по информации из текстовых сообщений

Предложенный подход использует открытую информацию для классификации событий дорожного движения, которые влияют на степень загруженности транспортной системы в области мониторинга. Результаты необходимы для оптимизации дорожного трафика и улучшения дорожной обстановки в городе. Методика включает четыре этапа преобразования собираемых коротких сообщений в информацию о дорожной ситуации (рис. 1):

1. Установка контакта с социальными сетями и сбор данных.
2. Очистка данных.
3. Выбор и классификация событий.
4. Визуализация событий на карте.

На первом этапе в процессе сбора данных устанавливается контакт с источниками. Извлеченные данные сохраняются в необработанном виде. Вместе с сообщениями собирается временная и геопространственная информация, а именно особенности рельефа местности, о которой идет речь в сообщении, географические координаты для фиксации границы участка. Сообщения о дорожном движении и транспортной ситуации в районе исследования сохраняются в базе данных.

Сообщения собираются из открытых сообществ социальных сетей согласно учетным записям пользователей, а также из новостных сайтов. Существует несколько интерфейсов прикладных программ, которые позволяют извлекать сообщения в соответствии с запросами или путем настройки PUSH-

уведомлений о появлении новых сообщений. Каждый раз, когда размещается новое сообщение в интересующем аккаунте пользователя или на новостном сайте, оно сохраняется в базы данных.

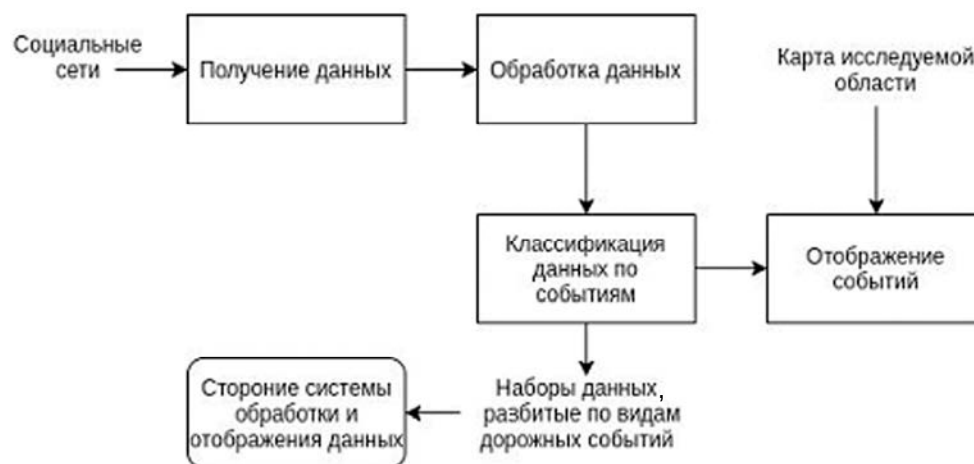


Рис. 1. Этапы преобразования данных

На этапе обработки сообщения классифицируются по ключевым словам, найденным в тексте сообщения. Определено пять классов дорожных событий: позитивные, заторы, препятствия, инциденты и прочие (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика классов сообщений

Класс	Описание
Позитивный	Сообщения о хороших дорожных условиях. Указывают на то, что транспортные средства могут передвигаться свободно
Затор	Сообщения о заторах и пробках
Препятствие	Сообщения о событиях, которые препятствуют нормальному движению транспортных средств
Инцидент	Сообщения о событиях, в которых люди или транспортные средства получили повреждения
Прочие	Сообщение не удалось классифицировать. Недостаточно информации для определения класса события

Подготовка данных к классификации происходит по следующей методике:

1. Специальный скрипт проводит лексический разбор текста, разделяет его на слова и удаляет знаки препинания.
2. Далее удаляются специфичные «стоп-слова». Словарь таких слов составлен с помощью сервиса Ranks NL (<https://www.ranks.nl/stopwords/russian>).
3. Устанавливается предварительный класс сообщения, чтобы применить метод «*k*-ближайших соседей». Здесь необходимо иметь набор слов, идентифицирующий классы Bag of words, который составлен с помощью сервиса RusVectōrēs (<http://rusvectors.org/ru>).

4. Подсчитывается количество совпадений слова в каждом наборе класса. Класс с наибольшим количеством совпадений присваивается сообщению.

В результате каждое сообщение получает метку класса, а также на выходе получается текст без специальных символов и стоп-слов, т.е. выполняется его «очистка».

На этапе классификации данных по событиям применяется алгоритм машинного обучения « k -ближайших соседей» (KNN – k-nearest neighbors), описание которого приведено ниже.

Пусть задана обучающая выборка пар «объект-ответ»

$$X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}.$$

Пусть на множестве объектов задана функция расстояния $p(x, x')$. Эта функция должна быть достаточно адекватной моделью сходства объектов. Чем больше значение этой функции, тем менее схожими являются два объекта x, x' .

Для произвольного объекта u расположим объекты обучающей выборки x_i в порядке возрастания расстояний до u :

$$p(u, x_{1,u}) \leq p(u, x_{2,u}) \leq \dots \leq p(u, x_{m,u}),$$

где через $x_{i,u}$ обозначается тот объект обучающей выборки, который является i -м соседом объекта u . Аналогичное обозначение введем и для ответа на i -м соседе: $y_{i,u}$.

Таким образом, произвольный объект u порождает свою перенумерацию выборки. В наиболее общем виде алгоритм ближайших соседей есть

$$a(u) = \operatorname{argmax}_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [x_{i,u} = y] w(i, u),$$

где $w(i, u)$ – заданная *весовая функция*, которая оценивает степень важности i -го соседа для классификации объекта u [3].

Перед использованием метода « k -ближайших соседей» сообщения нормализуются и приводятся к числовому виду. Для этого применяется векторная модель частоты слов в сообщениях. Строится словарь, который содержит слова, найденные в выбранных сообщениях, с информацией о частоте слов в каждом. Составление словаря происходит по следующему алгоритму:

1. Задается пустой словарь.
2. Для всех сообщений класса выполняется процесс:
 - а) сообщение разделяется на слова;
 - б) аналогичное слово ищется в словаре;
 - в) если слово присутствует в словаре, то его вес увеличивается на 1;
 - г) если слово не существует, то оно добавляется в словарь с весом 1.

3. Как только в словаре будут собраны все возможные ключевые слова и их частотные значения (частота повторений в сообщениях класса), выполняется переход к этапу нормализации сообщений.

На этапе нормализации строится векторное представление сообщения по следующему алгоритму:

1. Создается вектор с числом позиций, равным длине составленного словаря слов.

2. В каждую позицию вектора записывается количество повторений слова в сообщениях.

3. Если слово из словаря встречается n раз в сообщении, то в векторе на позиции слова сохраняется значение n .

4. Если слово из словаря не встречается в сообщении, то его значение в векторе устанавливается равным 0.

Полученные вектора сообщений далее используются при обучении и тестировании алгоритма « k -ближайших соседей». Алгоритм работает с ключами, которыми являются сгенерированные векторы. Алгоритм классифицирует сообщение, обрабатывая большое количество образцов, и в процессе кластеризации использует Евклидово пространство для вычисления расстояния между экземплярами.

Обучение и тестирование разработанного метода проводится посредством выполнения следующих действий:

1. Обрабатываются сообщения из обучающего набора данных.

2. Вычисляется классификация каждого вектора с помощью алгоритма « k -ближайших соседей».

3. Применяется «десятикратная перекрестная проверка». Основная идея: образцы делятся на десять наборов и каждый раз, когда один набор классифицируется, девять оставшихся наборов считаются обучающими.

4. Сообщению присваивается класс.

5. Присвоенный класс сравнивается с изначально назначенной классификационной меткой.

На этапах обучения и тестирования использовалась выборка из 500 сообщений. Набор сообщений был разделен на два массива:

1) обучающий, который состоит из 300 сообщений,

2) тестовый, который состоит из 200 сообщений.

Обучающая выборка имеет изначально установленную классификационную метку, присвоенную на втором этапе. Эта метка требуется, так как модель « k -ближайших соседей» учитывает отношение соседних сообщений для классификации тестового образца.

После классификации рассчитываются метрики для оценки эффективности. В качестве показателей эффективности выбраны: *точность* (*precision*), *полнота* (*recall*) и F -метрика. Показатель *точность* (*precision*) можно интерпретировать как долю объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющимися положительными, а показатель *полнота* (*recall*) показывает, какая доля объектов положительного класса из всех объектов положительного класса была найдена [4]. Существует несколько различных способов объединить *точность* (*precision*) и *полноту* (*recall*) в агрегированный критерий качества. F -мера (в общем случае

F_β) является одним из этих способов и представляет среднее гармоническое *precision* и *recall*:

$$F_\beta = (1 + \beta^2) \cdot \frac{\text{precision} \cdot \text{recall}}{(\beta^2 \cdot \text{precision}) + \text{recall}},$$

β в данном случае определяет вес точности в метрике, при $\beta = 1$ это среднее гармоническое (с множителем 2, чтобы в случае *precision* = 1 и *recall* = 1 иметь $F_1 = 1$), F -мера достигает максимума при полноте и точности, равных единице, и близка к нулю, если один из аргументов близок к нулю [5, 6].

Как только данные метрики достигают удовлетворительных результатов, модель становится готовой для классификации тестового набора. Метрики также подсчитываются при обработке тестового набора для целей аналитики и статистики.

2. Визуализация результатов кластеризации

Целью предложенного подхода является выделение и цветовая дифференциация областей на карте с проблемным дорожным трафиком, а также определение причин. Для этого координаты источника сообщения привязываются к цифровой картографической основе и в результате сообщение представляется меткой на карте. Для демонстрации работы метода выбран период наиболее высокой активности дорожного движения, а именно время утреннего часа пик. Исследуемой областью является центральная часть г. Пензы. На рис. 2 показана карта и обработанные сообщения в виде меток.

На карте отображены не все сообщения, но можно заметить, что пользователи активно пишут о дорожной ситуации и отмечают координаты проблемных мест. Анализ показал, что проблемные места в основном находятся в центральном и южном районах города. Это обусловлено тем, что большинство офисных помещений находится в центральной части города, а в южной части дорожная сеть давно не реконструировалась и перегружена.

На карте метками в виде красного креста изображены сообщения, классифицированные как аварии и столкновения. Желтым цветом отмечены сообщения о заторах и пробках. Красным отмечены области с препятствиями и сужениями дорог. Можно заметить, что в районах с повышенным трафиком число дорожных инцидентов больше. С другой стороны, если около дорожного инцидента появляются пробки, то повышается плотность трафика.

Зеленым цветом отмечены сообщения, классифицированные как отзывы о благоприятных дорожных условиях. Таких сообщений меньше, чем сообщений о плотном трафике или инцидентах, и располагаются они вне центральной части города, как правило, на дорогах с новым асфальтовым покрытием и низким трафиком. Это объясняется тем, что для экспериментального исследования метода был выбран наиболее напряженный в плане дорожной обстановки временной промежуток, когда поток машин сконцентрирован в центральной части города. Кроме того, люди больше заинтересованы сообщать о проблемных местах, чтобы выразить возмущение и беспокойство, чем сообщать о нормальной дорожной обстановке.

Главным преимуществом алгоритма NB перед « k -ближайших соседей», заключается в том, что NB генерирует собственный набор слов и вычисляет распределение слов до классификации данных. Несмотря на преимущества в нашем случае алгоритм NB показал худшие результаты. После тестирования показатель *precision* равен 0,75, *recall* – 0,69, *F*-метрика – 0,7.

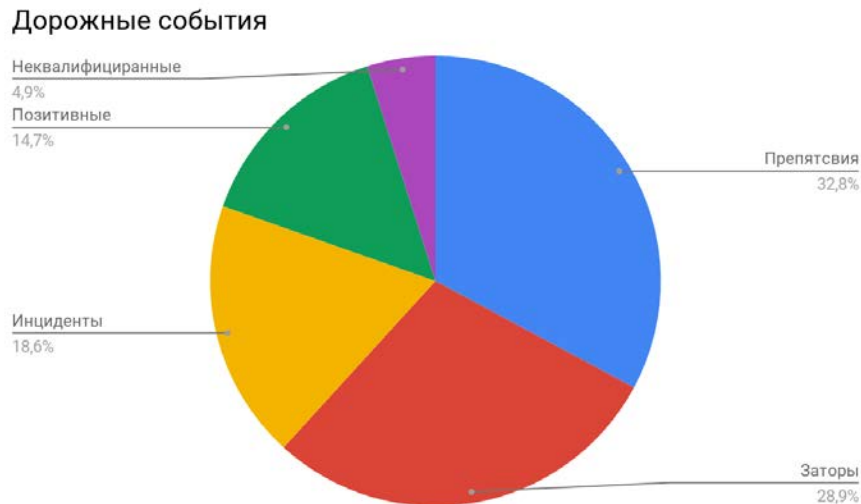


Рис. 3. Диаграмма распределения сообщений по классам

Заключение

В результате исследований были сделаны следующие выводы:

1. Метод обрабатывает тексты, полученные из социальных сетей, и позволяет классифицировать их с помощью алгоритма машинного обучения.
2. Метод был апробирован для анализа сообщений о событиях в дорожном движении. Однако его можно использовать для анализа и других сообщений, которые связаны с различными аспектами городской жизни, например: экология, реакция граждан на события и т.д.
3. Для анализа использовался набор сообщений из открытых групп, из социальных сетей. Информация из этих источников является достаточно актуальной и, помимо контента, содержит координатную информацию.
4. Набор классифицированных сообщений отражает дорожные события и показывает реакцию жителей, что позволяет использовать его для принятия решений по улучшению транспортной обстановки.

Поскольку муниципальная и научная сферы обеспокоены улучшением жизни людей, важность исследования процессов в городской среде возрастает с каждым годом. Дорожное движение в городе является одним из факторов, влияющих на городскую среду (например, пробки). Данные ситуации могут быть изучены с целью выявления причин и особенностей, а также оповещения аварийных и медицинских служб. Социальные сети являются важным источником информации, поскольку сообщения в них написаны людьми, описывающими события в непосредственной близости от них, причем в контенте хранится реакция участников дорожного движения.

Библиографический список

1. Википедия [Электронный ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page (дата обращения: 14.01.2018).
2. ВКонтакте [Электронный ресурс]. – URL: <https://vk.com> (дата обращения: 10.01.2018).
3. Профессиональный информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных “MachineLearning.ru”. – URL: <http://www.machinelearning.ru> (дата обращения: 16.01.2018).
4. **Мерков, А. Б.** Введение в методы статистического обучения / А. Б. Мерков. – Москва : Едиториал УРСС, 2011. – 254 с
5. Блог компании “Open Data Science”. – URL: <https://habrahabr.ru/company/ods/> (дата обращения: 17.01.2018).
6. **Марманис, Х.** Алгоритмы интеллектуального Интернета. Передовые методики сбора, анализа и обработки данных / Х. Марманис, Д. Бабенко. – СПб. : Символ-Плюс, 2011. – 480 с.

References

1. *Vikipediya*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page (accessed Jan. 14, 2018).
2. *Vkontakte*. Available at: <https://vk.com> (accessed Jan. 10, 2018).
3. *Professional'nyy informatsionno-analiticheskiy resurs, posvyashchennyy mashinnomu obucheniyu, raspoznavaniyu obrazov i intellektual'nomu analizu dannykh “MachineLearning.ru”* [Professional information and analytical resource dedicated to machine learning, pattern recognition and data mining “MachineLearning.ru”]. Available at: <http://www.machinelearning.ru>. (accessed Jan. 16, 2018).
4. Merkov A. B. *Vvedenie v metody statisticheskogo obucheniya* [Introduction to statistical methods]. Moscow: Editorial URSS, 2011, 254 p.
5. *Blog kompanii “Open Data Science”* [Blog of the “Open Data Science” company]. Available at: <https://habrahabr.ru/company/ods/> (accessed Jan. 17, 2018).
6. Marmanis Kh., Babenko D. *Algoritmy intellektual'nogo Interneta. Peredovye metodiki sbora, analiza i obrabotki dannykh* [Algorithms of the intellectual Internet. Advanced techniques for collecting, analyzing and processing data]. Saint-Petersburg: Simvol-Plyus, 2011, 480 p.

Ляпин Артур Мансурович
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: lyapinartur@gmail.com

Lyapin Artur Mansurovich
Postgraduate student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 004.048, 004.428.4

Ляпин, А. М.

Методика сбора и интеллектуального анализа коротких сообщений из сети Интернет с целью выявления внештатных ситуаций в дорожно-транспортной инфраструктуре / А. М. Ляпин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 27–36. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-3.

УМЕНЬШЕНИЕ НАГРУЗКИ И ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С НЕНАДЕЖНЫМИ УЗЛАМИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются распределенные вычислительные системы кластерного и кластерно-метакомпьютерного типа без постоянной связи между узлами. Предметом исследования является вычислительный процесс в распределенных системах с ненадежными узлами. Цель работы – уменьшить влияние административных отказов на протекание процесса вычислений в распределенной системе, а также уменьшить нагрузку на сеть и на вычислительные узлы и, таким образом, увеличить производительность.

Материалы и методы. Исследование и разработка стратегии повышения производительности в распределенных системах с ненадежными узлами выполнены с использованием теории надежности, теории марковских случайных процессов.

Результаты. Произведен анализ надежностных факторов, влияющих на производительность систем распределенных вычислений. Предложена классификация отказов в зависимости от аппаратных или административных причин. Рассмотрены имеющиеся системы, предотвращающие ошибки вычислений вследствие отказов разного рода. Предложена стратегия повышения производительности в системах распределенных вычислений с ненадежными узлами, позволяющая уменьшить влияние административных отказов на протекание процесса вычислений в распределенной системе, а также уменьшить нагрузку на сеть и увеличить производительность системы в целом.

Выводы. Анализ имеющихся систем предотвращения вычислительных ошибок и поддержания корректности вычислительного процесса в распределенных вычислительных системах позволил сделать выводы о том, что имеется возможность без использования специальных аппаратных средств обеспечить достаточную производительность и отказоустойчивость системы с ненадежными узлами. Для этого предложена соответствующая стратегия.

Ключевые слова: распределенная система, вычисления, кластер, подзадача, надежность, отказоустойчивость.

А. Н. Tokarev

LOAD REDUCING AND CAPABILITY RISE OF CALCULATIONS IN DISTRIBUTED COMPUTATIONAL SYSTEMS WITH UNRELIABLE NODES

© 2018 Токарев А. Н. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The research deals with the study of distributed computing systems of cluster and cluster-metacomputer type without a constant link between nodes. The subject of research is the computational process in distributed systems with unreliable nodes. The purpose of the study is to reduce the impact of administrative failures on the progress of the computation process in a distributed system, and to reduce the load on the network and on the compute nodes and, thus, increase productivity.

Materials and methods. Research and development of a strategy for increasing performance in distributed systems with unreliable nodes is performed using the theory of reliability, the theory of Markov random processes.

Results. The analysis of reliability factors affecting the performance of distributed computing systems is made. The classification of failures is proposed depending on hardware or administrative reasons. Existing systems that prevent errors in calculations due to failures of various kinds are considered. A strategy for improving performance in distributed computing systems with unreliable nodes is proposed, which makes it possible to reduce the effect of administrative failures on the process of computing in a distributed system, and reduce the load on the network and increase the overall system performance.

Conclusions. Comparison of descriptive capabilities of the two computer models of the collision process of the dummy with the windshield of the car proved that the second computer model satisfies the requirements of the established quality representations of the process of deformation and fracture of laminated safety glass in modern passenger cars. Analysis of existing systems preventing computational errors and maintaining the correctness of the computational process in distributed computing systems led to the conclusion that it is possible to provide sufficient performance and fault tolerance of a system with unreliable nodes without the use of special hardware. For this, an appropriate strategy has been proposed.

Key words: distributed system, calculations, cluster, subtask, reliability, fault tolerance.

При планировании решения задач в распределенных вычислительных системах метакомпьютерного и кластерно-метакомпьютерного типа разработчик сталкивается с проблемой надежного получения результата. Особенно это актуально в децентрализованных гетерогенных системах, имеющих в своем составе разнородные вычислительные узлы. Примером таких систем являются грид-системы, основанные на принципах Desktop Grid и состоящие в основной массе из обычных персональных компьютеров, которые сами пользователи предоставляют на добровольной основе для той или иной распределенной задачи.

Естественно, в таких системах не может быть речи о каком-то централизованном контроле за аппаратными средствами и запущенном на узлах программном обеспечении. Персональный компьютер (ПК), предоставленный пользователем для проекта, может иметь аппаратные проблемы (сбойную память, дисковые устройства с bad-блоками, сбойные чипсеты и контроллеры устройств ввода-вывода и т.п.). Ни одно устройство не застраховано от ошибок при расчете, передаче и хранении информации. Все это приводит к тому, что подзадача, выданная данному узлу, может быть решена некорректно. Таким образом, первый фактор, который следует учитывать, – *аппаратный*.

Кроме того, в рассматриваемых грид-системах отсутствует возможность централизованно управлять доступностью узлов и временем их непрерывной работы. Это значит, что выданная узлу подзадача с некоторой ненулевой (и иногда достаточно высокой) вероятностью не будет решена вовремя из-за того, что узел может быть перезагружен, выключен пользователем, на узле запущена другая задача, занимающая полностью процессорное время, и т.д. Особенно критичным этот фактор является в сильно связанных кластерно-метакомпьютерных системах, где решение задачи – гораздо менее длительный процесс, чем в классических Desktop Grid, и где каждый узел вносит свой весомый вклад. Это позволяет говорить о втором факторе обеспечения надежности, напрямую не связанном с техникой и аппаратным обеспечением. Назовем его *административным*.

Для учета аппаратного фактора можно использовать как аппаратные, так и программные методики обеспечения надежности вычислений и валидации результата.

Аппаратные средства контроля

К аппаратным средствам контроля можно условно отнести также аппаратно-программные средства и программные средства низкого уровня, к которым разработчик распределенных приложений не имеет непосредственного доступа.

В последние несколько лет крупными компаниями-производителями аппаратных средств ПК и контроллеров уделяется повышенное внимание вопросу контроля целостности данных и защите вычислительной системы от сбоев и непредумышленных либо предумышленных ошибок. Корпорация Intel предложила для этих целей свою аппаратно-программную систему, которая называется Intel Trusted Execution Technology (TXT). В свое время корпорации AMD и Intel уже осуществили успешное внедрение в массовые ПК технологий, защищающих программный код от ошибок или действий вредоносного кода. Это так называемый NX Bit (в терминологии Intel – XD Bit). Это бит запрета исполнения, который является атрибутом страницы памяти в таблице страниц. Бит определяет, что определенная страница является хранилищем данных, а не кода. В этом случае несанкционированное исполнение кода в этой странице запрещено. Ранее уязвимость подобного рода часто эксплуатировалась вредоносными программами при атаке так называемым способом переполнения буфера или некоторыми другими. Также в результате программных ошибок или сбоев времени выполнения программы может быть инициирован переход в другие области памяти. В случае использования бита контроля код за пределами разрешенной области сегмента кода уже не может быть исполнен, что дает некоторую степень контроля за процессом выполнения программы. Когда возникает подобная ситуация, управление посредством прерывания с сигналом SIGSEGV (выход за пределы сегмента) передается операционной системе либо управляющей программе, которая сможет проанализировать произошедшую ситуацию и соответствующим образом на нее отреагировать.

Технология защиты Intel TXT идет еще дальше. Ее работа основана на использовании аппаратного контроллера Trusted Platform Module, который осуществляет безопасную загрузку операционной системы в изолированной

области и выполнение программного кода в изолированной среде. Кроме того, возможно использование отказоустойчивого шифрования данных на всех этапах их ввода-вывода и хранения. Технология Intel TXT имеет встроенную систему самоконтроля, так называемую аттестацию, проходя которую, все компоненты TXT проверяются на целостность.

Всего в технологии несколько компонентов, с точки зрения отказоустойчивого исполнения кода нас интересуют прежде всего два:

1) защищенный запуск (Protected Launch): эта функция контролирует и защищает критические части операционной системы и другие, связанные с системой компоненты от несанкционированного доступа во время запуска. Например, компоненты ядра системы защищаются во время и после запуска;

2) защищенное выполнение (Protected Execution): эта возможность разрешает приложениям выполняться в изолированных окружениях, чтобы оставаться максимально защищенными от другого программного обеспечения, работающего на этой же платформе. Каждое приложение, которое выполняется в этом режиме, имеет доступ к своим собственным физически разделенным ресурсам.

Таким образом, аппаратно-программная технология Intel TXT, прежде всего направленная на контроль за целостностью кода и являющаяся неким «аппаратным антивирусом», помогает за счет отказоустойчивого шифрования и контроля за исполнением кода решить и смежную задачу – поддержать отказоустойчивый процесс вычислений.

Что касается чисто аппаратного контроля, то вычислительные узлы в этом случае должны содержать ряд соответствующих схематических и конструктивных решений:

- источники бесперебойного питания с аккумуляторной батареей;
- дублированные блоки питания (минимум 2);
- оперативная память с контролем четности (ECC);
- RAID-контроллеры дисков уровней RAID1 (зеркалирование) или RAID10 (зеркалирование с чередованием);
- дисковые контроллеры с резервной батареей;
- сетевые контроллеры с модулями проверки целостности данных и т.д.

Однако, поскольку нами рассматриваются распределенные вычислительные сети, наложенные на имеющуюся инфраструктуру вычислительной техники, о каком-либо достаточном распространении таких аппаратных средств говорить пока не приходится, так как они представлены в среде персональных компьютеров достаточно слабо.

Программные средства контроля

Чисто программные средства контроля вычислительного процесса в распределенных вычислительных системах можно разделить на две основные категории:

- 1) средства восстановления после отказа;
- 2) средства предотвращения отказа.

Средства восстановления после отказа могут либо осуществлять ограниченную коррекцию результата после обнаружения ошибки (если это возможно), либо полностью откатывать транзакцию по получению результата некорректно решенной подзадачи. Вследствие частности и ограниченности первого подхода, а также широкого диапазона решаемых задач, не позволя-

ющего применить универсальные средства коррекции, в большинстве распределенных вычислительных систем чаще всего используется второй подход.

Недостаток данного способа – вследствие необходимости повторного расчета потерянной подзадачи потери производительности могут быть чрезмерно велики, особенно в рассматриваемых системах с низкой административной надежностью.

Средства предотвращения отказа, т.е. применительно к распределенным вычислительным системам, – это прежде всего дублирование вычислительных узлов и *репликация подзадач*.

При этом подзадача, выданная одному вычислительному узлу, выдается другому вычислительному узлу (или нескольким узлам), и после окончания расчета сервер сравнивает результаты. Если они совпадают либо отличаются на величину допустимого отклонения, то результат принимается верным и подзадача считается решенной. Недостаток такого подхода очевиден – избыточность расчетов, необходимость загрузки узлов одинаковыми подзадачами, что приводит к падению производительности системы до уровня 50 % от максимально достижимой, а в некоторых случаях и менее.

Для уменьшения избыточности можно воспользоваться методом адаптивной репликации. Например, в вычислительных сетях BOINC [1] данный метод заключается в следующем. Для каждого вычислительного узла h сервер хранит его коэффициент ненадежности $e(h)$. Изначально $e(h) = 0,1$. В дальнейшем его значения рассчитываются следующим образом:

$e(h) = e(h) \cdot 0,95$ – если результат решения подзадачи был признан верным;

$e(h) = e(h) + 0,1$ – если результат решения подзадачи был признан ошибочным.

Таким образом, коэффициент $e(h)$ представляет собой как бы «плохую репутацию» узла или степень его ненадежности. Для того чтобы уменьшить плохую репутацию и завоевать доверие, нужно значительное время решать подзадачи без ошибок. А вот увеличить плохую репутацию можно очень быстро, решив одну-две подзадачи неверно.

Сервер решает, реплицировать ли подзадачу, проверяя следующее условие (по умолчанию $a = 0,05$):

$$e(h) > a .$$

Если условие выполняется, то узел считается ненадежным и подзадача, выдаваемая ему, реплицируется на другой узел для проверки. Иначе узел считается надежным с вероятностью

$$p_{trust} = 1 - \sqrt{\frac{e(h)}{a}} ,$$

и ему выдается нереплицированная подзадача.

При этом достигается гораздо более низкая степень загрузки узлов решением избыточных подзадач, поскольку в целом количество ошибочных результатов из-за аппаратно ненадежных узлов является гораздо меньшим, чем количество подзадач, решаемых при классической репликации (нагрузка

падает, по разным оценкам, с 50 % до 5–10 %). Недостаток данного способа очевиден – из-за оперирования вероятностными терминами приходится смириться с тем, что часть подзадач может быть решена некорректно, и в зависимости от класса решаемой задачи это можно либо допустить, либо необходимы дополнительные проверки после окончания процесса расчетов, а в наихудшем случае – пересчет задачи заново.

Рассмотрим более подробно второй упомянутый нами фактор надежности узла – административный.

Как показывает практика расчетов в распределенных вычислительных системах рассматриваемых типов, именно этот фактор наиболее сильно влияет на их общую производительность. Вычислительные узлы в таких системах имеют тенденцию «исчезать» и «появляться», при этом подзадачи, выданные узлам, естественно, решаются далеко не всегда.

Естественным решением для таких систем, казалось бы, является уменьшение объема выдаваемой узлам подзадач до минимально возможного. При этом потерянная подзадача легко и быстро может быть решена заново. Однако такая стратегия хороша только на первый взгляд. Дело в том, что в этом случае пропорционально уменьшению объема подзадачи растут расходы на прием-передачу данных по сети и время обработки подзадачи в соответствии с алгоритмом функционирования системы распределенных вычислений (упаковка/распаковка данных, создание процессов расчета, проверка и т.д.). Поэтому просто так уменьшать объем подзадачи нельзя, следует воспользоваться математическими методами расчета объемов подзадач, которые учитывали бы большинство имеющихся факторов.

Для распределенных систем с достаточной степенью статичности состава автором предлагается стратегия повышения производительности с учетом отказов узлов [2]. Под отказом мы, как уже было сказано, понимаем недоступность узла, вызванную как аппаратными, так и иными факторами, в совокупности составляющими «административный отказ».

Данная стратегия опирается на статистику отказов (характеристику надежности узла), полученную опытным путем. Для ее реализации на серверном узле (узлах) размещается специальное программное обеспечение, вычисляющее функцию надежности $P_w(t)$ для каждого узла, основанную на анализе журнала доступности узла за определенный период времени.

Фактически данное программное обеспечение представляет собой в простейшем случае модуль, осуществляющий периодическую процедуру *ping* в отношении каждого узла вычислительной системы. Результат каждого отклика заносится в журнал (лог-файл или таблицу базы данных). Впоследствии анализатор считывает эти данные и формирует характеристику надежности каждого узла.

Чем больше период анализа функционирования узла, тем более точной получается его характеристика надежности (т.е. зависимость вероятности безотказной работы от времени работы). Оператор вычислительной системы имеет возможность просмотреть журнал доступности и графики надежности для каждого узла в удобном виде (рис. 1).

В более сложном случае модуль может высчитывать не только доступность каждого узла в определенный момент времени, но и иные характери-

стики, анализ которых позволит осуществить оптимизацию процесса разбиения задачи. К примеру, можно отмечать для каждого проверочного отсчета такие характеристики, как загрузка CPU и GPU, активность дисковой подсистемы и т.д.

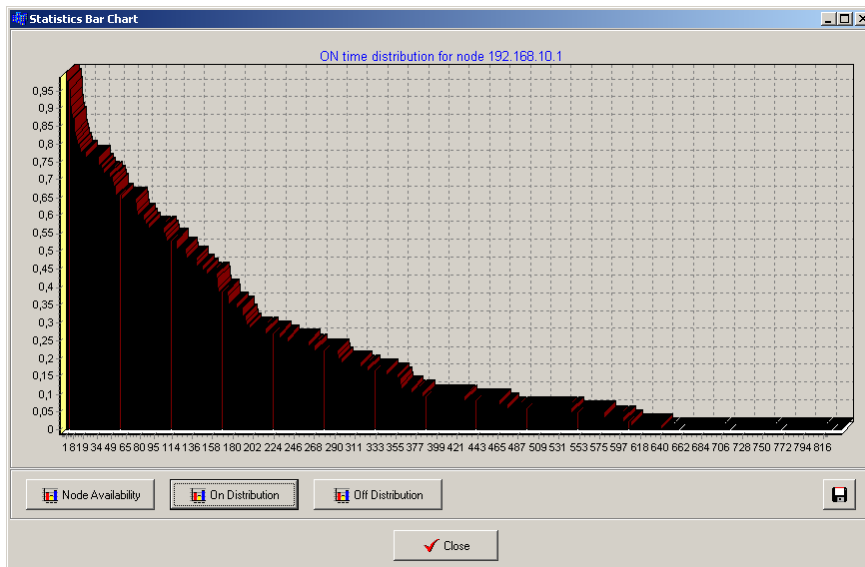


Рис. 1. Статистически полученная функция надежности узла

Стратегия размещения подзадач основана на том факте, что надежность узла постепенно уменьшается со временем его работы, что следует из графика на рис. 1. При этом, чтобы избежать бесполезного расчета подзадачи, которая с той или иной вероятностью будет потеряна во время отказа узла, ему с течением времени функционирования выдаются подзадачи уменьшенного объема, учитывающие время его безотказной работы на каждом этапе. После отказа и восстановления узла считается, что узел опять имеет максимальную надежность, и он получает подзадачу максимального объема. Описание стратегии и формулы для расчета объемов подзадач приведены в [2].

Недостатком предложенной стратегии, как уже было сказано, является то, что она требует наличия статистических данных о функционировании узлов. Такие данные могут быть получены только в системах, имеющих статическую структуру, наличие и состав узлов в которых является постоянным. В реальных системах типа Desktop Grid выполнить это требование достаточно сложно. Поэтому необходима такая стратегия размещения подзадач, которая в динамике учитывала бы изменение состава системы распределенных вычислений и надежность характеристики ее узлов.

Анализ процесса функционирования узлов показал, что такая стратегия может быть получена с использованием теории марковских случайных процессов.

Одним из определений марковского процесса является следующее утверждение: при фиксированном состоянии процесса в настоящий момент времени будущее и прошлое состояния марковского процесса независимы [3]. Или, можно сказать, что случайный процесс, протекающий в систе-

ме, называется марковским, если для любого момента времени t_0 вероятность любого состояния системы при $t > t_0$ зависит только от ее состояния при $t = t_0$ и не зависит от того, как и когда система пришла в это состояние.

В нашем случае, как показано на рис. 2, процесс функционирования каждого вычислительного узла представляет собой чередование двух состояний (работы и восстановления), причем состояние, в которое узел перейдет в определенный момент, зависит только от того, в каком состоянии он находился до перехода (состояния чередуются), и не зависит от более ранних состояний узла.

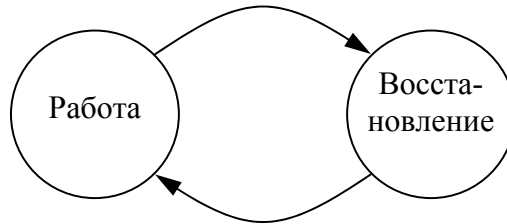


Рис. 2. Возможные состояния вычислительного узла

Таким образом, мы можем рассматривать процесс функционирования каждого вычислительного узла системы как дискретный марковский процесс с двумя состояниями.

Процесс $\Theta(t)$ в любой момент времени может иметь лишь одно из значений $v_1 = 1$ (работа) и $v_2 = 0$ (восстановление), причем вероятность перехода $v_1 \rightarrow v_2$ (отказ узла) за малое время Δt равна $\lambda \Delta t$, а вероятность перехода $v_2 \rightarrow v_1$ (возврат узла к работе) равна $\mu \Delta t$. Известны вероятности начального состояния $p_1^0 = 1$, $p_2^0 = 0$.

Имея эти исходные данные, можно определить вероятность перехода $\pi_{ij}(t_0, t) = P\{\Theta(t) = v_j | \Theta(t_0) = v_i\}$, где $v_1 = 1$, $v_2 = 0$, $i, j = 1, 2$.

В общем случае имеет место система линейных дифференциальных уравнений, полученных из уравнения Колмогорова – Чепмена:

$$\frac{\partial}{\partial t} \pi_{ij}(t_0, t) = \sum_{k=1}^2 a_{kj}(t) \pi_{ik}(t_0, t), \quad i, j = 1, 2,$$

где a_{kj} – крутизна изменения вероятности на небольшом отрезке времени.

Для того чтобы применительно к реальным условиям иметь возможность решить эту систему уравнений, необходимо некоторое упрощение, в качестве которого и приняты ранее указанные соотношения $a_{12} = \lambda$, $a_{21} = \mu$, и из условий нормировки $a_{11} = -\lambda$, $a_{22} = -\mu$.

Это значит, что на достаточно небольшом отрезке времени график функции надежности узла можно аппроксимировать линейной функцией.

Поэтому воспользуемся методикой расчета переходных вероятностей для дискретного марковского процесса с двумя состояниями и с постоянными

коэффициентами a_{ij} , предложенной в [3]. Исходя из этой методики в результате решения системы уравнений, полученной из уравнений Колмогорова – Чепмена, с учетом постоянных коэффициентов получим следующие выражения для переходных вероятностей:

$$\pi_{11}(\tau) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right) e^{-(\lambda + \mu)\tau}, \quad \pi_{12}(\tau) = \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right) \left[1 - e^{-(\lambda + \mu)\tau} \right],$$

$$\pi_{22}(\tau) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) e^{-(\lambda + \mu)\tau}, \quad \pi_{21}(\tau) = \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) \left[1 - e^{-(\lambda + \mu)\tau} \right].$$

Прежде всего нас из этих вероятностей интересует вероятность перехода π_{12} узла из состояния 1 в состояние 2, т.е. отказ узла.

Определим значение времени τ из этого выражения:

$$\tau = -\frac{1}{\lambda + \mu} \ln \left[1 - \frac{\pi_{12}(\lambda + \mu)}{\lambda} \right].$$

Полученное выражение позволит нам, задавшись вероятностью отказа узла $\pi_{12} < \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$, получить время этого отказа τ с учетом поведения узла, описываемого функцией надежности.

То есть фактически мы получаем возможность определить время безотказной работы узла на каждом этапе. А зная время безотказной работы узла, а также его производительность и пропускную способность канала связи, мы легко можем выдать ему подзадачу такого объема, чтобы она была решена в рамках обозначенного времени.

Перед началом работы необходимо осуществить начальное разбиение задачи. Метод этого разбиения может быть любым. Можно предложить два простых варианта:

- 1) равномерное разбиение;
- 2) разбиение с учетом производительности узлов.

При этом по мере работы изначально выданный объем данных будет корректироваться и приближаться к значению, которое можно охарактеризовать как «максимальный объем подзадачи за время безотказной работы узла».

Общий алгоритм работы сервера в данном случае будет таким.

После выдачи стартового набора подзадач вычислительным узлам сервер переходит в состояние приема результатов. Для каждого узла, приславшего результат, сервер отмечает время его расчета и выдает следующую подзадачу.

Если узел вместо результата решения подзадачи присылает серверу пустой запрос на решение, сервер по этому признаку определяет, что имел место отказ узла во время решения ранее выданной ему подзадачи. К этому моменту серверу известны следующие характеристики, относящиеся к этому узлу:

- количество выданных узлу и успешно решенных подзадач K ;
- объем каждой подзадачи S_j ;
- время решения каждой подзадачи узлом t_j ;

– время, прошедшее с момента выдачи последней подзадачи до момента пустого запроса узла на выдачу новой подзадачи t_{K+1} .

Из этих характеристик можно приблизительно определить время безотказной работы узла на первом этапе:

$$t_w^{(1)} \approx \sum_{j=1}^K t_j,$$

и время восстановления после первого отказа:

$$t_f^{(1)} \approx t_{K+1}.$$

Эти времена позволят приближенно определить параметры линейных функций, аппроксимирующих функцию надежности и функцию восстановления. Эти параметры определяются как интенсивности переходов:

$$\lambda^{(1)} = \frac{1}{t_w^{(1)}}, \mu^{(1)} = \frac{1}{t_f^{(1)}}.$$

Имея эти коэффициенты, мы определяем значение времени безотказной работы узла τ .

Дальнейшее распределение подзадач осуществляется уже с учетом найденного значения времени τ так, чтобы данный узел получил подзадачу такого объема, который будет рассчитан в пределах промежутка времени $(0; \tau)$. После следующего отказа узла процесс перерасчета повторится.

Коррекция на каждом шаге значений λ и μ приводит к тому, что по мере протекания процесса вычислений и по мере накопления сведений о длительности промежутков работы и восстановления каждого узла выдаваемые узлам объемы подзадач все точнее приближаются к оптимальному значению, которое можно выразить как максимальный объем за время безотказной работы узла.

Таким образом, предложенная стратегия размещения подзадач позволит уменьшить влияние административных отказов на протекание процесса вычислений в распределенной системе, а также уменьшить нагрузку на сеть и на узлы и, таким образом, увеличить производительность вычислений.

Библиографический список

1. Программное обеспечение с открытым исходным кодом для организации добровольных распределенных вычислений и распределенных вычислений в сети. – URL: <http://boinc.berkeley.edu/>
2. **Токарев, А. Н.** Оптимизация размещения подзадач в распределенных вычислительных системах с ненадежными узлами / А. Н. Токарев // Актуальные проблемы современной науки : тр. 1-го Междунар. форума. – Самара, 2005. – С. 113–116.
3. **Горяинов, В. Т.** Статистическая радиотехника : примеры и задачи / В. Т. Горяинов, А. Г. Журавлев, В. И. Тихонов. – М. : Сов. радио, 1980. – 544 с.

References

1. *Programmnoe obespechenie s otkryтым iskhodnym kodom dlya organizatsii dobrovol'nykh raspredelennykh vychisleniy i raspredelennykh vychisleniy v seti* [Open source

software for organizing voluntary computing and distributed computing in a network]. Available at: <http://boinc.berkeley.edu/>

2. Tokarev A. N. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki: tr. 1-go Mezhdunar. Foruma* [Actual problems of modern science: proceedings of the 1st International Forum]. Samara, 2005, pp. 113–116.
3. Goryainov V. T., Zhuravlev A. G., Tikhonov V. I. *Statisticheskaya radiotekhnika: primery i zadachi* [Statistical radio engineering: examples and tasks]. Moscow: Sov. radio, 1980, 544 p.

Токарев Андрей Николаевич

магистрант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ant19@mail.ru

Tokarev Andrey Nikolaevich

Master's degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 004.75

Токарев, А. Н.

Уменьшение нагрузки и повышение производительности вычислений в распределенных вычислительных системах с ненадежными узлами /
А. Н. Токарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 37–47. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-4.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРОЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ РИСКА ОТКАЗА ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Оборудование в проекте является активной компонентой внутреннего окружения. По фазам жизненного цикла проекта необходимо обеспечивать комплекс мероприятий, влияющих на организационно-технологическую надежность и риски отказа оборудования. На каждой фазе менеджер проекта должен оценивать эффективность принятых решений, отслеживать изменения системы в целом, формировать тактику управления проектом для достижения стратегических целей. Однако современные инструментальные средства проектного управления не позволяют разрабатывать стратегические решения по фазам проекта, а позволяют решать лишь частные вопросы планирования и составления расписаний, распределения финансов, контроль их расходования, разработки документации, идентификации, анализа и контроля рисков, то есть решаются задачи управления отдельными подсистемами проекта, оптимизируются разрозненные объекты и цели проекта. Поэтому перспективным направлением в рассматриваемой предметной области может стать разработка информационно-управляющей системы (ИУС) для решения задач управления проектами промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования. В разработке управляющих решений должен использоваться инструментарий, позволяющий отслеживать состояние проекта и адаптировать стратегию управления с учетом уровня риска отказа оборудования. Основные цели работы: 1) провести систематизацию данных для формирования управляющих решений по фазам жизненного цикла проекта с учетом риска отказа оборудования; 2) разработать концепцию формализации состояния среды проекта с учетом рисков ситуаций, реализуемой ИУС; 3) разработать структуру и функции ИУС.

Материалы и методы. В основе разработки ИУС используется метод ситуационного управления. Под управлением проектом с учетом риска отказа оборудования понимается реализация стратегии, вырабатываемой по отклонению текущей ситуации в проекте от целевой ситуации. Методами системного анализа, принятия решений и обработки данных формируется представление об объекте управления по состоянию оборудования и состоянию проекта в соответствии с фазой жизненного цикла (предынвестиционной, инвестиционной, эксплуатационной).

Результаты. Представлены структура и функции ИУС. Решение ключевых вопросов реализовано в прикладном программном обеспечении. Для выработки стратегии управления проектом система позволяет проводить моделирование инвестиционного проекта, оценивание состояния оборудования в проекте,

обработку экспертных оценок, определять общую эффективность оборудования в проекте, определять уровень риска отказа оборудования.

Выводы. Разработанная ИУС позволяет повысить качество управления на прединвестиционной, инвестиционной и эксплуатационной фазах проекта. С использованием ИУС менеджером определяется объем инвестиций в основные производственные фонды проекта, формируется стратегия загрузки, стратегия обслуживания и ремонта оборудования. Применение системы возможно для реализации проектов на действующих промышленных предприятиях.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, моделирование проектов, риск отказа оборудования, экспертная оценка, стратегия управления.

N. A. Shumilina

INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR SOLVING THE MANAGEMENT TASKS OF PROJECTS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES RISK-BASED ON EQUIPMENT FAILURE

Abstract.

Background. Equipment in the project is an active component of the internal environment. In the phases of the life cycle of the project, it is necessary to provide a set of measures that affect organizational and technological reliability and the risks of equipment failure. At each phase, the project manager must evaluate the effectiveness of the decisions taken, monitor the changes in the system as a whole, and shape the tactics of project management to achieve strategic goals. However, modern project management tools do not allow you to develop strategic solutions for the phases of the project. Allow to solve only the private issues of planning and scheduling, the distribution of finance, control of their expenditure, the development of documentation, identification, analysis and control of risks, that is, the tasks of managing individual subsystems of the project are being handled, and the disparate objects and objectives of the project are optimized. Therefore, the development of an information management system (IMS) for the solution of tasks of project management of industrial enterprises taking into account the risk of equipment failure can become a promising area in the subject area under consideration. In the development of management solutions, tools should be used to monitor the status of the project and adapt the management strategy to the level of risk of equipment failure. The main objectives of the work are: 1) to organize the data for the formation of management decisions for the phases of the life cycle of the project, taking into account the risk of equipment failure; 2) develop a concept for formalizing the state of the project environment, taking into account the risk situations implemented by the IMS; 3) develop the structure and functions of the IMS.

Materials and methods. The method of situational management is used in the basis of IUS development. Under the project management, taking into account the risk of equipment failure is understood the implementation of the strategy developed by rejecting the current situation in the project from the target situation. Methods of system analysis, decision-making and data processing form a view of the management object on the state of the equipment and the state of the project in accordance with the phase of the life cycle (pre-investment, investment, operational).

Results. The structure and functions of the IMS are presented. Solutions to key issues are implemented in application software. To develop a project management strategy, the system allows for the simulation of the investment project, the assessment of the equipment condition in the project, the processing of expert assess-

ments, determine the overall efficiency of equipment in the project, and determine the level of risk of equipment failure.

Conclusions. The developed ICS allows to improve the quality of management at the pre-investment, investment and operational phases of the project. With the use of IMS, the manager determines the amount of investment in the basic production assets of the project, the strategy of loading, the strategy of maintenance and repair of equipment. The application of the system is possible for the implementation of projects at existing industrial enterprises.

Key words: information-control system, project modeling, risk of equipment failure, expert evaluation, management strategy.

Введение

Текущий период развития промышленных предприятий характеризуется выстраиванием новых систем управления, которые должны повышать их эффективность и управляемость. Актуальными являются проектно-ориентированные системы управления, позволяющие адаптировать действующее предприятие требованиям современной экономики. Проект в управленческой деятельности – временное предприятие, направленное на создание уникального продукта, услуги или результата [1]. На уровне методологий проектного управления (PMI, IPMA, PRINCE2) международных (PMBOK, COSO, ICB) и национальных стандартов (ГОСТ Р ИСО 21500–2014) большое внимание уделяется вопросам поддержки принятия решений в условиях неопределенности и риска [2, 3]. Однако все материалы по идентификации, анализу, мониторингу и управлению рисками носят обобщенный характер, позволяют управляющему составу верхнего уровня выявить основные принципы и перечень процессов проектного менеджмента, но не дают конкретных инструментов для выработки управленческих решений.

Наиболее перспективным, с точки зрения управляемости и разработки инструментария для принятия управленческих решений в проектах промышленных предприятий, является риск отказа оборудования, который напрямую зависит от текущего состояния оборудования, интенсивности его эксплуатации, а также от эффективности организации работ по его техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР), что, в свою очередь, влияет на соблюдение сроков, бюджета и ресурсов проекта [4].

В данной статье предлагается подход к разработке информационно-управляющей системы проектов промышленных предприятий, который позволит обеспечить эффективность принятия решений с учетом риска отказа оборудования по фазам жизненного цикла. Новизна предлагаемого подхода – учет риска отказа оборудования как основа для построения стратегии обслуживания оборудования в проекте, стратегии загрузки оборудования в проекте и стратегии формирования резервов проекта с целью обеспечения его устойчивого развития.

Процесс принятия решений

Информационно-управляющая система предназначена для основного технологического процесса проекта. Технологический процесс реализует все стадии переработки сырья и выпуска готовой продукции с использованием

N групп производственного оборудования, выделенных по функциональному признаку [5]. Уровень проектного риска отказа оборудования $R_{ij}(t)$ на t -м шаге реализации проекта рассчитывается следующим образом:

$$R_{\text{отк}}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M R_{ij}(t),$$

где $R_{ij}(t)$ – уровень риска отказа j -го элемента i -й группы оборудования, используемого в проекте на t -м шаге реализации проекта; M – количество элементов в группе оборудования.

В подготовке данных информационно-управляющая система объединяет функции ERP-систем и MES-систем управления производством [6]. Данные для подготовки информации в управленческие решения формируются системами следующего уровня:

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

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

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

Для выявления рисков отказа оборудования проектов промышленных предприятий формируются следующие потоки данных: $\bar{X}_{\text{об}}(t)$ – параметры состояния оборудования в проекте; $\bar{U}_{\text{об}}(t)$ – входные данные для оценки состояния оборудования; $\bar{Y}_{\text{об}}(t)$ – выходные данные оценки состояния оборудования; $\bar{U}_{\text{пр}}(t)$ – данные для оценки эффективности проекта; $\bar{Y}_{\text{пр}}(t)$ – результаты оценки эффективности проекта.

Совокупность данных описывает различные стороны проявления состояния оборудования проектов промышленных предприятий: технологическую, экономическую, организационную. По результатам анализа предметной области была проведена систематизация данных по фазам жизненного цикла проекта (табл. 1).

Процесс принятия решений на множестве управляющих воздействий $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ зависит от состояния проекта $s \in S$, т.е. фазы проекта и от уровня риска отказа оборудования. Информационно-управляющая система из потоков данных $\bar{X}_{\text{об}}(t)$, $\bar{U}_{\text{об}}(t)$, $\bar{Y}_{\text{об}}(t)$, $\bar{U}_{\text{пр}}(t)$, $\bar{Y}_{\text{пр}}(t)$ формирует информацию для управления с учетом риска отказа оборудования в проекте на базе разработанных моделей и прикладных программ.

На предынвестиционной фазе уровень риска отказа оборудования учитывается при определении объема инвестиций на основные производственные фонды и их влияние на эффективность проекта (затраты, прибыль). На инвестиционной фазе учитывается влияние риска отказа оборудования при выборе технологии и определении производственных мощностей проекта,

а также при анализе пусконаладочных работ (затраты, прибыль, время). На эксплуатационной фазе учитывается риск отказа оборудования при определении прибыли от производства продукции и издержек производства на обслуживание и ремонт оборудования (затраты, прибыль, время, качество продукции). Для каждого состояния среды на t -м шаге реализации проекта менеджер проекта, используя информационно-управляющую систему, разрабатывает эталоны вариантов решений с учетом $R_{\text{отк}}(t)$.

Таблица 1

Параметры состояния оборудования
и состояния проекта по фазам жизненного цикла

Фаза	Предынвестиционная / Инвестиционная	Эксплуатационная	
		Эксплуатация	Выбытие из проекта (утилизация)
1	2	3	4
Цель	Определение объема инвестиций, контроль соблюдения требований ввода в эксплуатацию, настройка оборудования	Мониторинг технико-экономических параметров оборудования, ТОиР	Соблюдение порядка вывода (утилизации) оборудования из проекта
Особенности состояния оборудования в проекте $\bar{X}_{\text{об}}(t)$	Стоимость пусконаладочных работ, время пусконаладочных работ, результаты обработки партии продукции и проверка ее качества	Стоимость ТОиР оборудования, полезное операционное время, потери в скорости, простои, потери от брака продукции	Ликвидационная стоимость, время утилизации
Данные для оценки состояния оборудования $\bar{U}_{\text{об}}(t)$	Ресурс оборудования, эффективный возраст, статистика отказов, технико-экономические показатели, загрузка оборудования в проекте (операционное время, простои)	Время нагрузки оборудования, время цикла, наработка до отказа, число отказов в течение данной наработки, число работоспособных и отказавших объектов, объем произведенной продукции, объем бракованной продукции	Общее количество деталей, количество годных и негодных деталей, количество деталей, требующих восстановления
Результаты оценки состояния оборудования $\bar{Y}_{\text{об}}(t)$	Вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа, наработка на отказ, коэффициент износа, коэффициент готовности, доступность, эффективность, уровень качества, общая эффективность, остаточный ресурс, риск отказа оборудования $R_{\text{отк}}(t)$		Коэффициент годности, коэффициент восстановления

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Данные для оценки эффективности проекта $\bar{U}_{\text{пр}}(t)$	Объем инвестиций, характер производства, сменность, условия работы, общие сведения о применяемой технологии, вид производимой продукции, условия начала и завершения реализации проекта, продолжительность расчетного периода, экономическое окружение, производственная мощность проекта		
	Затраты на приобретение оборудования, на организационные и инженерные работы, на подготовку технической документации. Время на обследование объекта, внешний осмотр оборудования и выполнение монтажных работ, время на испытания оборудования, регулировку и настройку, определение соответствия технических характеристик смонтированного оборудования техническим требованиям, установленным технической документацией предприятий-изготовителей оборудования и проектом, комплексное опробование оборудования с наладкой технологического процесса и выводом на устойчивый проектный технологический режим, обеспечивающий выпуск первой партии продукции	Прибыль за период t , налог на прибыль, горизонт расчета, ставка дисконтирования, норма амортизации, шаг расчета (год, квартал, месяц), денежный поток от инвестиционной деятельности за период t , денежный поток от операционной деятельности за период t , денежный поток от финансовой деятельности за период t	
Результаты оценки эффективности проекта $\bar{Y}_{\text{пр}}(t)$	Срок окупаемости инвестиций, коэффициент эффективности инвестиции, чистый дисконтированный доход, индекс рентабельности инвестиции, внутренняя норма рентабельности, дисконтированный срок окупаемости инвестиции		
	Риск отказа оборудования на инвестиционной фазе	Риск отказа оборудования на эксплуатационной фазе	

Формализация состояния среды проекта

В рамках разработанной системы формализация состояния среды проекта с учетом риска отказа оборудования предлагается в виде нечеткой ситуационной сети (НСС). Концептуальная схема представлена на рис. 1.

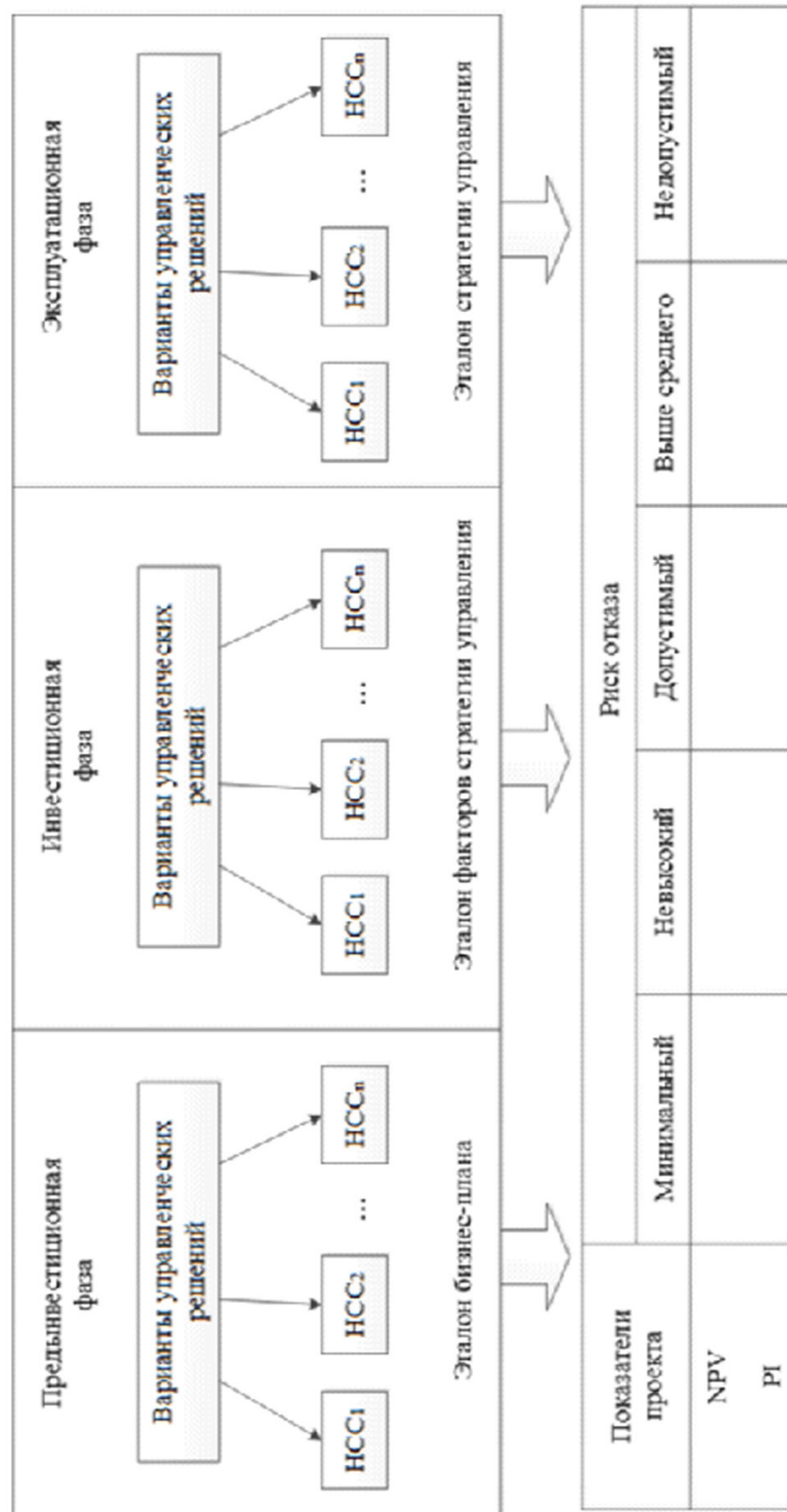


Рис. 1. Концептуальная схема формализации состояния среды проекта с учетом рисков ситуаций, реализуемая информационно-управляющей системой

Формулировка задачи управления представляет собой стратегию управления проектом на предынвестиционной, инвестиционной, эксплуатационной фазах. Стратегия управления заключается в следующем.

Текущее состояние проекта $S(t)$ на каждой фазе должно соответствовать такому состоянию функционирования, при котором $S(t) \subseteq S_{\text{тек}}^{\Pi}$, где $S_{\text{тек}}^{\Pi}$ – целевое состояние проекта, которое задает уровень загрузки оборудования и уровень организационно-технологических мероприятий по поддержанию работоспособного состояния оборудования, определяемого уровнем риска отказа оборудования. Состояние проекта должно соответствовать требуемым значениям показателей эффективности проекта $\bar{Y}_{\text{пр}}(t)$, задаваемых заказчиками проекта или определяемых исходя из миссии и цели реализации проекта.

При возникновении проблемных ситуаций (сбои в работе оборудования, приводящие к ухудшению качества продукции, нарушения в проведении наладки, настройки оборудования, несоблюдения сроков ремонта и обслуживания и т.д.), т.е. отклонении от планового, нормального и, тем более, оптимального состояния функционирования проекта обнаруживают «ситуацию управления». «Ситуация управления» соответствует необходимости определить наличие или отсутствие отклонений по риску отказа оборудования $R_{\text{отк}}(t)$ и показателям эффективности проекта $\bar{Y}_{\text{пр}}(t)$, что осуществляется через сравнение $S(t)$ и $S_{\text{тек}}^{\Pi}$.

Процедура выработки стратегии управления проектом по отклонению от $S_{\text{тек}}^{\Pi}$ строится исходя из требований целевой функции, которую рассматриваем в следующей постановке: обеспечить качество процесса ввода и освоения мощностей проекта с учетом риска отказа оборудования $R_{\text{отк}}(t)$ по следующему набору показателей качества управления проектом:

- $\text{NPV}(R_{\text{отк}}(t))$ – устойчивость проекта;
- $\text{IRR}(R_{\text{отк}}(t)), \text{PI}(R_{\text{отк}}(t))$ – точность проекта;
- $\text{DPP}(R_{\text{отк}}(t))$ – быстродействие проекта.

Стратегия управления рассматривается как последовательность переходов между нечеткими ситуациями внутри нечеткой ситуационной сети. Вариант построения сети рассматривается в работе [7].

Функции по управлению проектом и структура информационно-управляющей системы

Разработанная информационно-управляющая система по фазам жизненного цикла реализует следующие функции по управлению проектом (рис. 2):

- определяет модель инвестиционного проекта;
- определяет экспертную оценку состояния оборудования в проекте;
- организует работу экспертных групп;
- определяет производительность оборудования и эффективность проекта;
- определяет уровень риска отказа оборудования с учетом важности его влияния на бюджет, время и качество продукции;
- определяет стратегию управления проектом с учетом риска отказа оборудования.

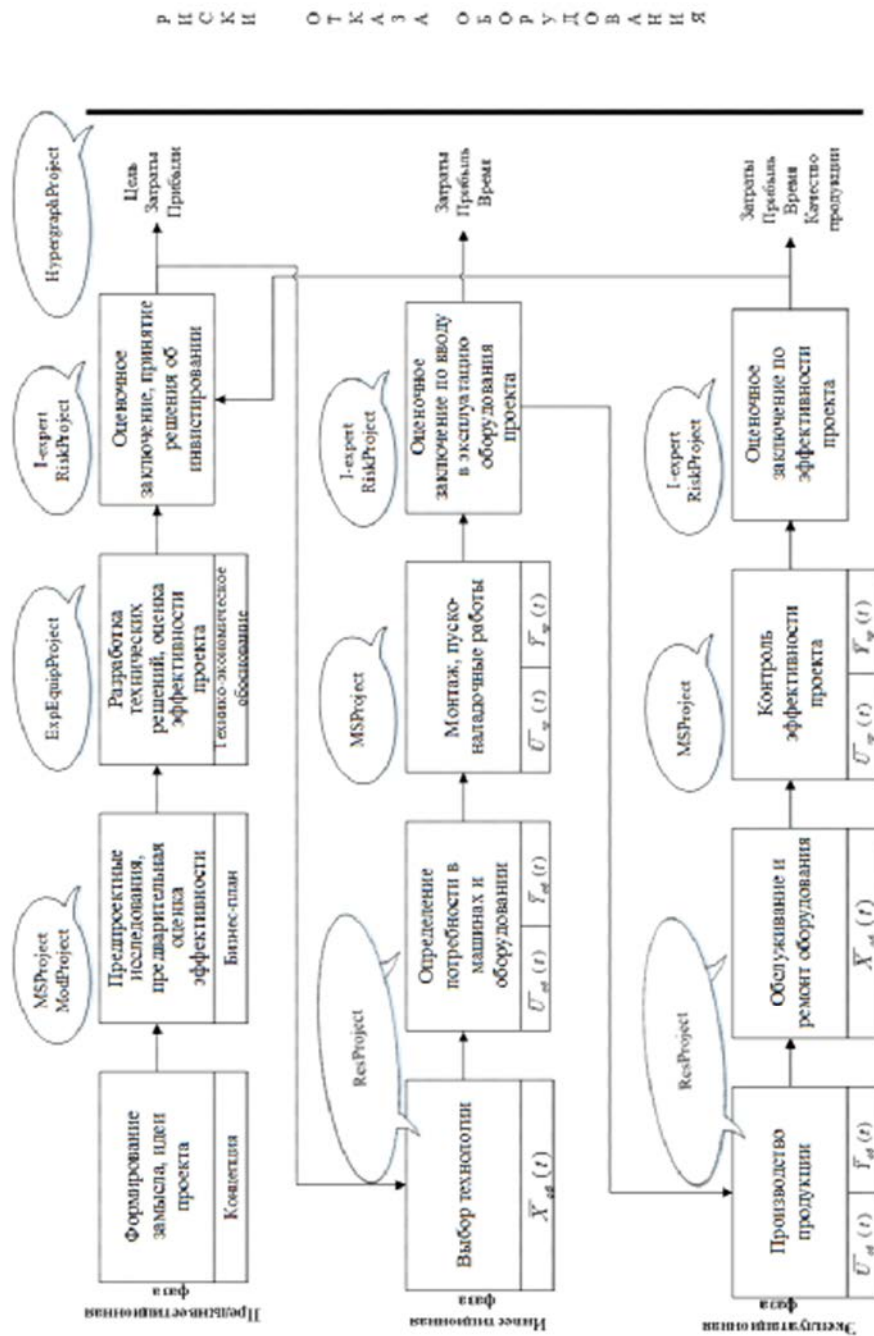


Рис. 2. Схема функционирования информационно-управляющей системы по фазам жизненного цикла проекта

Функции информационно-управляющей системы реализованы в следующих прикладных программах:

- ModProject. Система моделирования инвестиционных проектов работает в двух режимах: в режиме разработки проектов и в режиме моделирования. Благодаря наличию блока выбора модели, блока моделирования и базы данных система моделирования инвестиционных проектов существенно отличается от других программных продуктов, предназначенных для планирования и оценки проектов. Разработанная методика позволяет выбирать математическую модель для инвестиционного планирования в зависимости от типа проекта. Данное программное средство может быть использовано при ведении переговоров между разработчиком проекта, заказчиком и инвестором) [8].

- ExpEquipProject. Экспертная система оценки состояния технологического оборудования проектов промышленных предприятий позволяет произвести расчеты показателей, оценивающих физический износ технологического оборудования и чувствительность инвестиционного проекта в зависимости от полученных результатов расчета. Экспертная система формирует необходимый для выполнения перечень рекомендаций [9].

- I-expert. Программа для расчетно-аналитической работы экспертных групп представляет собой средство обработки экспертной информации для определения количественного и качественного состава экспертной группы, построения многоуровневой структуры показателей с привлечением экспертной группы, определения диапазона и значения нечетких переменных [10].

- RiskProject. Программа «Оценка проектного риска отказа оборудования на основе теории нечетких множеств» поддерживает процесс принятия решений по каждому виду технологического оборудования о его замене/продолжении эксплуатации в течение жизненного цикла рассматриваемого проекта по значениям KPI (ключевые показатели производительности оборудования проекта) и показателям эффективности проекта [11].

- ResProject. Программа для определения KPI. При наличии существующих систем контроля, из которых можно получать оперативные данные о работе оборудования, определяется значение показателей эффективности работы оборудования, качества продукции.

- HypergraphProject. Программа разрабатывает нечеткую ситуационную сеть для определения последовательности действий или путей перехода между любой исходной и целевой ситуацией, т.е. разрабатывает стратегию управления проектом на основе риска отказа оборудования.

В соответствии с вышеописанными функциями информационно-управляющей системы сформировано хранилище данных и следующие подсистемы: планирования проекта, оценки состояния оборудования, эксплуатационного управления оборудованием, формирования стратегии управления проектом. Структура информационно-управляющей системы представлена на рис. 3.

Апробация разработанных решений

На примере оценки риска отказа оборудования в проекте реконструкции одного из деревообрабатывающих предприятий Оренбургской области проведена апробация разработанных решений [11, 12]. Функционал системы использовался для поддержки принятия управленческих решений на предынвестиционной фазе.

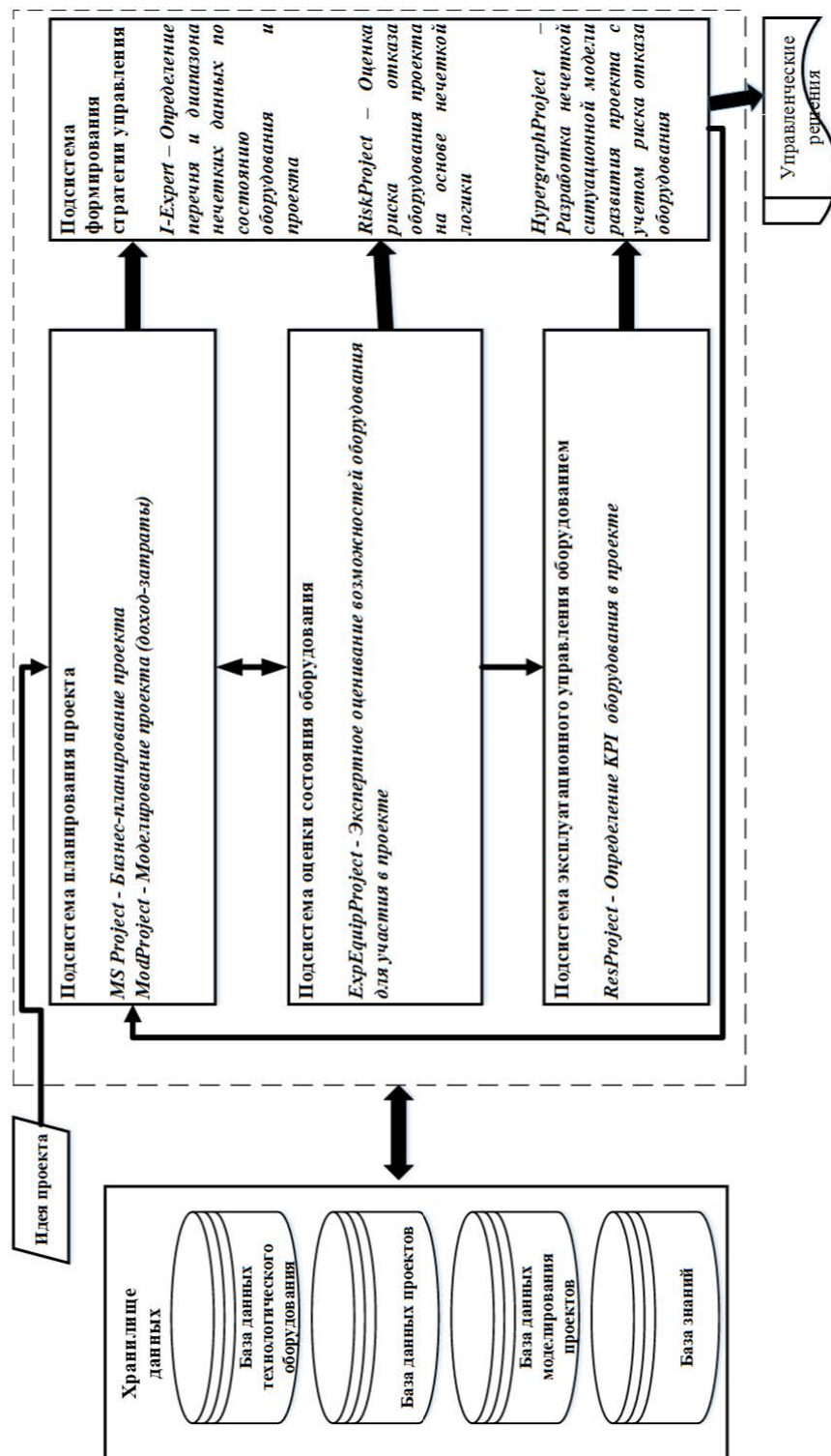


Рис. 3. Структура информационно-управляющей системы оценки рисков отказа оборудования проектов промышленных предприятий

Решаемая задача – оптимизация состава производственного оборудования проекта за счет варьирования объема инвестиционных вложений в приобретение нового/дополнительного оборудования. Уровень риска отказа производственного оборудования учитывается в качестве ограничения, характеризующего производственный потенциал проекта, а также объем инвестиций, необходимых для обновления оборудования.

В подсистеме «Планирование проекта» оформляются предпроектные исследования и предварительная оценка эффективности проекта с использованием MS Project. Далее менеджер проекта в режиме моделирования ModProject определяет уровень затрат и результатов реализации проекта, при которых коммерческая эффективность этого проекта соответствует заданным параметрам эффективности (рис. 4).

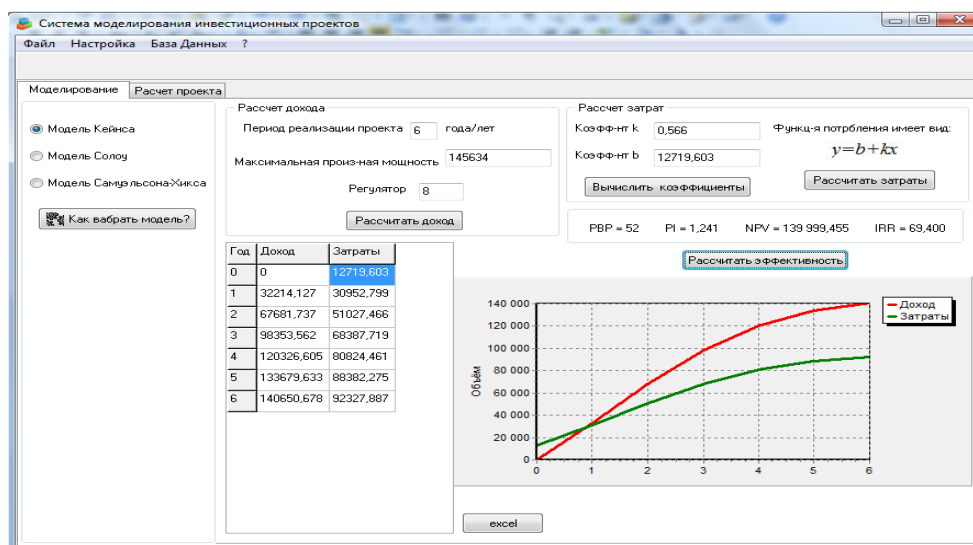


Рис. 4. Режим моделирования проекта

Для рассматриваемого проекта (по результатам моделирования): срок реализации проекта – 6 лет, уровень дохода – 140,65 млн ден. ед., затраты – 92,32 млн ден. ед. Для формирования модели проекта использовалась база данных ранее осуществленных проектов, аналогичных по масштабу и срокам реализации. В свою очередь результаты моделирования сохраняются для формирования базы знаний информационно-управляющей системы.

База данных технологического оборудования используется для экспертного оценивания состояния оборудования предприятия в ExpEquipProject. Система формирует сведения по потенциальным возможностям оборудования и влиянию на эффективность проекта для принятия управленческих решений (рис. 5).

Для исследуемого деревообрабатывающего оборудования установлен износ оборудования допустимый, состояние оценивается как хорошее. Анализ чувствительности проекта показал, что значение чувствительного края при изменении переменных издержек составляет 31,4 %, т.е. не опасно для эффективности проекта. Однако постоянные расходы не дают такого запаса прочности, так как изменение постоянных расходов по значению чувстви-

тельного края составляет 7,5 %. В этом случае для дальнейших управленческих решений об инвестировании требуется оценить риск отказа оборудования, вводимого в проект, с учетом срока реализации проекта, нагрузки оборудования и технического обслуживания и ремонта.

Рис. 5. Экспертное оценивание состояния оборудования

Подсистема «Формирование стратегии управления» с использованием программ I-expert и RiskProject отображает состояние оборудования и проекта с учетом риска отказа для принятия управленческих решений. Пример подготовленной информации представлен в табл. 2–4, содержащих данные для формирования стратегии управления проектом на инвестиционной фазе.

Таблица 2

Оценка входных и выходных лингвистических переменных для проекта «Организация производства стенового бруса»

Вид оборудования	Хар-пр-ва	Смен-ть	Усл. раб.	Рем. раб.	Физ. износ	Эффект. возраст	Сост. обор-я
Станок 1	0,9	2,2	1,5	30	20	31,2	22,4
Станок 2	0,7	1,9	1,5	20	10	37,3	14,4
Станок 3	1	2,9	1,5	50	18	22,2	21,5
Станок 4	0,83	2,5	3	30	10	37,2	20,3

Таблица 3

Значения выходных лингвистических переменных для выделенных зон риска отказа оборудования

Уровень риска	Минимальный	Невысокий	Допустимый	Выше среднего	Недопустимый
Тэф	37	35	30	26,5	25
СО	25	22	18	15	12

Примечание. Тэф – эффективный возраст; СО – состояние оборудования.

Далее программа HypergraphProject формирует ситуационную сеть. Для принятия решения об инвестировании проекта на основе нечеткой ситуации-

онной сети определяется наилучшая последовательность управляющих решений. Нечеткое ситуационное управление разрабатывается для стратегии загрузки оборудования и стратегии технического обслуживания и ремонта.

Таблица 4

Результаты оценки эффективности проекта
для различных зон риска отказа оборудования

Наименование показателя	Минимальный	Невысокий	Допустимый	Выше среднего	Недопустимый
$\Delta V_{\text{инв}}, \%$	–38	–49,1	–53,8	–59,4	–71,4
$\Delta NPV, \%$	7,8	10,3	11,3	14,2	17,0
$\Delta IRR, \%$	12,2	19,0	25,6	30,7	37,3

Примечание. V – объем инвестиций; NPV – чистая приведенная стоимость; IRR – внутренняя норма доходности.

Заключение

Для устойчивого управления проектами промышленных предприятий в условиях риска отказа оборудования разработана информационно-управляющая система. В статье представлены концепция, структура и функции системы. Определены границы объекта управления в описании следующих потоков данных: состояние оборудования в проекте, входные и выходные данные по проекту и оборудованию в проекте. Структура информационно-управляющей системы разработана в следующих подсистемах:

- «Планирование проекта» – бизнес-планирование и моделирование проекта;
- «Оценка состояния оборудования» – экспертное оценивание и анализ физического износа оборудования;
- «Эксплуатационное управление состоянием оборудования» – определение общей эффективности оборудования в проекте;
- «Формирование стратегии управления» – работа экспертных групп, определение риска отказа оборудования, определение уровня загрузки оборудования и величины ремонтного цикла.

Библиографический список

1. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK) – Пятое издание. – Project Management Institute, Inc., 2013.
2. **Дмитриев, К.** Современные стандарты и практики в области К УПД // К. Дмитриев, А. Филимонов. – URL: www.bmstu.ru/Современные%20стандарты%20и%20практики%20в%20области%20К%20УПД_14052013_last.pdf
3. **Костылев А. А.** Проектное управление по стандарту ISO 21500–2012: обзор и перспектива использования / А. А. Костылев // Социально-экономические явления и процессы. – 2014. – Т. 9, № 12. – С. 145–150.
4. **Гаибова, Т. В.** Адаптивное управление процессом освоения проектных мощностей с учетом производственного риска отказа оборудования / Т. В. Гаибова, Н. А. Шумилина // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 3 (28). – С. 96.
5. **Гаибова, Т. В.** Формализация задачи управления проектным риском отказа оборудования / Т. В. Гаибова, Н. А. Шумилина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 90 – 93.

6. MES-системы: функции и преимущества // Портал «Tadviser», статья от 2010/05/09. – URL : <http://www.tadviser.ru>
7. **Боровский, А. С.** Нечеткая ситуационная сеть для оценки проектного риска отказа оборудования / А. С. Боровский, Н. А. Шумилина // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2018. – Т. 68, № 1. – С. 87 – 93.
8. Прикладная программа «Расчетно-аналитическая работа экспертных групп (I-expert)», свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2017663457 (Роспатент) / Н. А. Шумилина, А. В. Арефьева, О. В. Дружаев ; правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – № 2017660246 ; заявл. 12.10.2017 ; регистр. 04.12.2017.
9. Прикладная программа «Система моделирования инвестиционных проектов», свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2018610463 (Роспатент) / Н. А. Шумилина, Т. В. Гаибова, Е. Н. Гришин ; правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т» – № 2017661595 ; заявл. 13.11.2017 ; регистр. 11.01.2018.
10. Прикладная программа «Оценка состояния технологического оборудования проектов промышленных предприятий» свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2018610487 (Роспатент) / Н. А. Шумилина, Т. В. Гаибова, А. В. Васильев ; правообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбург. гос. ун-т». – № 2017661502 ; заявл. 13.11.2017 ; регистр. 11.01.2018.
11. **Гаибова, Т. В.** Оценка проектного риска отказа оборудования на основе теории нечетких множеств / Т. В. Гаибова, Н. А. Шумилина // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2013. – № 2. – С. 10–16.
12. **Гаибова, Т. В.** Методика формирования оптимального состава оборудования в проектах реконструкции с учетом производственного риска / Т. В. Гаибова, Н. О. Поданенко, Н. А. Шумилина // Актуальные вопросы современной науки : сб. науч. тр. – Вып. 26. – Новосибирск : СИБПРИНТ, 2013. – С. 189–199.

References

1. *Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniyu projektami (Rukovodstvo PMBOK). Pyatoe izdanie* [Guide to the Project Management Body of Knowledge]. Project Management Institute, Inc., 2013.
2. Dmitriev K., Filimonov A. *Sovremennye standarty i praktiki v oblasti K UPD* [Modern standards and practices in K UPD]. Available at: [www.bmstu.ru/ Sovremennye%20standarty%20i%20praktiki%20v%20oblasti%20K%20UPD_14052013_last.pdf](http://www.bmstu.ru/Sovremennye%20standarty%20i%20praktiki%20v%20oblasti%20K%20UPD_14052013_last.pdf)
3. Kostylev A. A. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Socio-economic phenomena and processes]. 2014, vol. 9, no. 12, pp. 145–150.
4. Gaibova T. V., Shumilina N. A. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet-journal Naukovedeniye]. 2015, vol. 7, no. 3 (28), p. 96.
5. Gaibova T. V., Shumilina N. A. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Scientific and engineering bulletin of Volga region]. 2015, no. 2, pp. 90–93.
6. *MES-sistemy: funktsii i preimushchestva* [MES systems: features and benefits]. Portal «Tadviser», stat'ya ot 2010/05/09. Available at: <http://www.tadviser.ru>
7. Borovskiy A. S., Shumilina N. A. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute of Systems Analysis of the Russian Academy of Sciences]. 2018, vol. 68, no. 1, pp. 87–93.
8. Shumilina N. A., Aref'eva A. V., Druzhaev O. V. *Prikladnaya programma «Raschetno-analiticheskaya rabota ekspertnykh grupp (I-expert)», svidetel'stvo o registratsii programm dlya EVM № 2017663457 (Rospatent); pravoobladatel' Feder. gos. byudzh. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya «Orenburg. gos. un-t». № 2017660246; zayavl. 12.10.2017; registr. 04.12.2017* [Application program “Cash-analytical work of expert groups (I-expert)”, certificate of registration of computer programs

- № 2017663457 (Rospatent); copyright holder Federal State Budgetary Institution of Higher Education Orenburg State University № 2017660246; registered 04.12.2017].
9. Shumilina N. A., Gaibova T. V., Grishchin E. N. *Prikladnaya programma «Sistema modelirovaniya investitsionnykh projektov»*, *svidetel'stvo o registratsii programm dlya EVM № 2018610463 (Rospatent); pravoobladatel' Feder. gos. byudzh. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya «Orenburg. gos. un-t» № 2017661595; zayavl. 13.11.2017; registr. 11.01.2018* [Application program “Investment project modeling system”, certificate of registration of computer programs № 2018610463 (Rospatent); copyright holder Federal State Budgetary Institution of Higher Education Orenburg State University № 2017661595; declared 13.11.2017; registered 11.01.2018].
10. Shumilina N. A., Gaibova T. V., Vasil'ev A. V. *Prikladnaya programma «Otsenka sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya pro-ektov promyshlennykh predpriyatiy»*, *svidetel'stvo o registratsii programm dlya EVM № 2018610487 (Rospatent); pravoobladatel' Feder. gos. byudzh. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya «Orenburg. gos. un-t» № 2017661502; zayavl. 13.11.2017; registr. 11.01.2018* [Application program “Assessment of the state of technological equipment of industrial enterprises projects”, certificate of registration of computer programs № 2018610487 (Rospatent); copyright holder Federal State Budgetary Institution of Higher Education Orenburg State University 2017661502; declared 13.11.2017; registered 11.01.2018].
11. Gaibova T. V., Shumilina N. A. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovation. Investments]. 2013, no. 2, pp. 10–16.
12. Gaibova T. V., Podanenko N. O., Shumilina N. A. *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki: sb. nauch. tr.* [Actual issues of modern science: collected articles]. Issue 26. Novosibirsk: SIBPRINT, 2013, pp. 189–199.

Шумилина Наталья Александровна
старший преподаватель, кафедра
управления и информатики
в технических системах, Оренбургский
государственный университет (Россия,
г. Оренбург, пр. Победы, 13)

E-mail: shumilina_na@mail.ru

Shumilina Nataliya Aleksandrovna
Senior lecturer, sub-department
of management and computer science
in technical systems, Orenburg State
University (13 Pobedy avenue,
Orenburg, Russia)

УДК 658.5

Шумилина, Н. А.

Информационно-управляющая система для решения управленческих задач проектов промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования / Н. А. Шумилина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 48–63. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-5.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ О СТЕПЕНИ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предметом исследования является синтез алгоритмов оценки качества обученности студентов вузов как степени сформированности предписанных компетенций. Цель работы – описание и обсуждение предложенного алгоритма выявления актуального состояния обучающегося как объекта мониторинга и процедуры отнесения выявленного состояния к заданному априори классу состояний с использованием байесовского решающего правила.

Материалы и методы. В основу исследования положен системный подход, а именно рассмотрение обучающегося (объекта мониторинга) как сложной стохастической многосвязной системы. Для оценки состояния системы используются методы распознавания с обработкой результатов распознавания в соответствии с классификатором Байеса.

Результаты. Предложен и обоснован алгоритм распознавания состояния объекта мониторинга и методика формирования решающего правила отнесения состояния объекта к некоторому классу состояний, соответствующему адекватности объекта предъявляемым нормативными документами требованиям. Оценены риски процедур распознавания и классификации.

Выводы. Предложен подход к оценке качества обученности студентов, основанный на методике определения состояния сложных систем, адаптированной для исследуемой предметной области с учетом сложности поведения исследуемых объектов. На основании этого подхода предложен простой, универсальный, адаптированный для практического применения алгоритм, относительно легко реализуемый с применением стандартных программно-аппаратных средств.

Ключевые слова: компетенция, мониторинг, обучающийся, распознавание, классификатор Байеса.

E. A. Dement'ev, V. V. Kan, B. L. Svistunov

DECISION-MAKING OF THE DEGREE OF PROFESSIONAL FORMATION COMPETENCES OF STUDENTS BASED ON MONITORING RESIDUAL KNOWLEDGE

Abstract.

Background. The subject of the research is the synthesis of algorithms for assessing the quality of training of university students as the degree of formation of prescribed competences. The purpose of this work is to describe and discuss the proposed algorithm for identifying the actual status of the learner as a monitoring

object and the procedure for classifying the detected state to a given a priori class of states using the Bayesian decision rule.

Materials and methods. The research is based on a systematic approach, namely, the study of a learner (monitoring object) as a complex stochastic multiply connected system. To assess the state of the system, recognition methods are used with recognition results processing according to the Bayesian classifier.

Results. An algorithm for recognizing the state of a monitoring object and a method for forming a decisive rule for assigning the state of an object to a certain class of states corresponding to the adequacy of the object to the requirements of regulatory documents are proposed and justified. The risks of recognition and classification procedures are assessed.

Conclusions. An approach is proposed for assessing the quality of students' training, based on the technique for determining the state of technical systems adapted for the researched subject area, taking into account the complexity of the behavior of the researched objects. On the basis of this approach, a simple, universal, adapted for practical application algorithm is proposed, relatively easily implemented using standard software and hardware.

Key words: competence, monitoring, learner, recognition, Bayesian classifier.

Введение

Задача оценки качества обученности как степени сформированности предписанных федеральными образовательными стандартами компетенций имеет первостепенное значение на всех уровнях образования. Особенно актуальна эта проблема в высшем образовании в связи с внедрением компетентностного подхода в рамках федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования третьего поколения и необходимостью согласования его требований с профессиональными стандартами.

Поставленной задаче посвящены многочисленные исследования [1, 2], количество которых постоянно растет. Вместе с тем указанная проблема в большинстве известных авторам работ, как правило, рассматривается односторонне, с сугубо гуманитарной точки зрения, прежде всего педагогики, психологии, социологии. При этом публикуемые результаты зачастую отличаются декларативностью, недостаточной математической формализованностью, прогностической способностью, что, как следствие, приводит к затруднениям при их практическом использовании в реальном учебном процессе.

Это обстоятельство, на наш взгляд, определяет необходимость внедрения в данную область методики и инструментария теории систем, адекватного математического аппарата, использования информационных технологий, что обеспечит возможность реализации соответствующей требованиям времени образовательной парадигмы [3].

Постановка задачи исследования

В теории систем хорошо разработаны способы оценки актуального состояния исследуемого (управляемого) объекта как системы, его прогнозируемого ресурса, времени и качества «жизни», направления и скорости эволюции. Анализ объективной информации о состоянии и поведении (в системном смысле) обучающегося как объекта мониторинга позволяет принимать обоснованные управленческие решения, приводящие к достижению заданной цели – обеспечению качества образования как основы компетентности, т.е.

профессиональной пригодности и, соответственно, востребованности выпускника вуза. Отметим, что эти системные качества выпускника в первую очередь интересуют его потенциального работодателя.

Основная проблема трансляции понятийного и математического аппарата теории систем, а также ее методологического инструментария в предметную область образования связана со сложностью модели состояния обучающегося как объекта контроля и управления. Объект в данной постановке представляется динамической системой, характеризующейся рядом специфических свойств, а именно: многопараметровостью и многосвязностью, стохастическим характером поведения, выраженными нелинейностями и синергетическими эффектами его эволюции [4].

Ввиду многоаспектности поставленной задачи ограничимся в данной статье рассмотрением задач, возникающих при мониторинге остаточных знаний как основы для оценки сформированности предписанных федеральными государственными образовательными стандартами компетенций и, следовательно, как ресурс будущего специалиста (бакалавра, магистра) [5].

Важнейшим аспектом формализации этой процедуры является принятие решения о классификации выявленного состояния обучающегося как объекта мониторинга, в частности, определение его предельного (критического) состояния. Критичность заключается в том, что находящийся в этом состоянии объект (в перспективе дипломированный бакалавр, магистр, специалист, выпускник вуза, колледжа) потенциально не способен удовлетворять квалификационным требованиям (в частном случае не удовлетворяет установленным требованиям по данному курсу, блоку дисциплин, виду учебной деятельности). В другой терминологии это означает невозможность реализовать целевую функцию с приемлемым (нормированным) качеством.

Уровень сохраненности и операционной доступности остаточных знаний в этом рассмотрении определяет тот допустимый минимальный остаточный ресурс, который можно трактовать как характеристику степени удаленности обучающегося от перехода в некоторое нормированное (заданное априори) критическое состояние (или, напротив, степень приближенности к этому состоянию).

Описание предлагаемого подхода

В качестве базового положения предлагаемого подхода нами использовано утверждение, выдвинутое в классической работе [6] и заключающееся в том, что обучение (в широком смысле) состоит, или, по крайней мере, может быть редуцировано [7] к формированию у обучающегося некоторого необходимого и достаточного комплекса взаимообусловленных и адекватных данной познавательной ситуации правил распознавания и отбора формирующихся в процессе обучения образов, а также связанных с ними понятий. Успешность обучения состоит, в частности, в максимальном соответствии понятий, воспроизводимых, формулируемых обучающимися в процессе контроля «правильным» (идеальным, каноническим, общепринятым) понятиям и прогнозируемой (с приемлемой вероятностью) готовности успешно использовать их в профессиональной деятельности.

Рассмотрим процедуру оценки, используя математический аппарат теории систем. Пусть имеется некоторый объект – обучающийся, степень обу-

ченности которого (понимаемой здесь как сформированность предписанных компетенций), подлежит оценке. Объект представим как систему, характеризуемую параметрами состояния, динамическими переменными, уравнением состояния и уравнением эволюции. Множество моделей m данной системы в смысле постановки задачи оценки степени обученности составляет некоторый тезаурус M так, что $m \in M$. Пусть модели m отличаются друг от друга набором качеств и количественных значений некоторого множества параметров, характеризующих определенное состояние A объекта. Тезаурус M есть параметрическое семейство $M(A)$, а $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ представляет собой вектор параметров (качеств, свойств) объекта такой, что $a_k \in A_k$ ($k = \overline{1, n}$), где A_k – диапазон возможных состояний объекта, который включает в себя допустимые состояния ($A_0 \in A_k$).

В соответствии со спецификой задачи оценки априори нормативно определен минимально допустимый предписанный набор состояний $A_0 \in A$ (т.е. группа моделей $m_0 \in M$), который, будучи выявлен в результате контроля, может быть в совокупности с другими данными об обучающемся интерпретирован как показатель сформированности некоторой компетенции K .

Таким образом, в процессе мониторинга определяется текущее состояние $a_i \in A$ объекта и устанавливается, входит ли это состояние в множество допустимых состояний A_0 . Этот вывод, по сути, означает, что степень обученности объекта соответствует некоторой модели $m^* \in m_0 \in M$. Соответствие выявляется в процедуре сравнения с априори заданным критерием r ; т.е.

$$m^* = \arg \min r(m_0, a_i) \quad (1)$$

таким, что

$$\nabla r(a_i) = \left(\frac{\partial r(a_i)}{\partial a_1}, \dots, \frac{\partial r(a_i)}{\partial a_k} \right) = 0. \quad (2)$$

Критерий r есть некоторый статистический функционал, т.е. задача оценивания сводится к процедуре стохастической аппроксимации, обеспечивающей сходимость выражения

$$P\{\lim[r(a_i) - r(a_0)] = 0\} = 1. \quad (3)$$

Степень выполнения условия (3) предлагается принять в качестве объективной оценки качества обученности (в простейшем случае – качества выполнения конкретного контрольного задания). Будучи обобщена на определенном множестве $a_i \in A$, эта оценка характеризует степень сформированности предписанной компетенции.

Для реализации данного алгоритма целесообразно провести более детальную декомпозицию состояния объекта (т.е. тезауруса M), выделив определенные подклассы моделей, соответствующих векторам состояния A_i (классы состояния).

Под классом состояния будем понимать принадлежащее множеству значений вектора состояний объекта подмножество, коррелирующее с неко-

торой заданной содержательной интерпретацией условий, при которых объект еще может считаться соответствующим заданному уровню требований. Например, пространство состояний объекта может разделяться на следующие классы, соотнесенные с условиями ранжирования:

- объект адекватен требованиям при значениях функционала (3), близких к 1;
- объект не адекватен на данном уровне, но адекватен при переходе на более низкий уровень содержания тезауруса M (снижение требований к содержанию, количеству заданий и увеличению времени на их выполнение);
- объект не адекватен на любом из возможных уровней (значение функционала (3) близко к нулю).

Для оптимизации процедуры отнесения состояния объекта к некоторому классу состояний путем распознавания его свойств определяемые в процессе испытания характеристики, т.е. наблюдаемые и измеряемые параметры, целесообразно преобразовать в вектор признаков $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, который соответствует актуальному состоянию. Переменные параметры x_i используются для диагностики состояния объекта. Возможные значения вектора X образуют пространство признаков.

Распознавание осуществляется путем сопоставления найденного вектора признаков с описанием соответствующего класса состояний объекта. Результатом сопоставления является отнесение актуального состояния объекта к какому-либо классу [8]. Степень соответствия определяет решающее правило вида (3).

Значения параметров состояния объектов могут с различной вероятностью входить в состав нескольких классов состояния, поэтому в процессе распознавания возможны ошибки. Система распознавания допускает ошибку в том случае, если она относит к определенному классу q_i состояние, в действительности принадлежащее другому классу q_j .

Пример алгоритма для признаков, определяемых в непрерывных числовых шкалах

Для определенности рассмотрим алгоритм распознавания состояния объекта, сводящийся к процедуре отнесения его актуального состояния к некоторому классу состояний, для случая, когда все признаки задаются и определяются в непрерывных числовых шкалах (например, шкале рейтинговых баллов).

Основой подхода к задаче классификации образов в числовом пространстве признаков является статистическая теория принятия решений.

Пусть $Q = (q_1, q_2, \dots, q_i)$ – множество рассматриваемых классов состояния объекта. Каждый класс q_i в пространстве признаков X задан некоторым числовым множеством, следовательно, вектор признаков $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ представляет собой многомерную случайную величину. Зададим условные плотности $p(X | q_i)$ распределения вероятностей вектора X , предполагая его принадлежность к заданному классу q_i . Зададим априорные вероятности $P(q_i)$ принадлежности объекта этому классу. Тогда апостериорную вероят-

ность принадлежности состояния объекта к заданному классу q_i определяем следующим образом, используя байесовское правило:

$$P(q_i / X) = P(q_i) \rho(X / q_i) / p(X), \quad (4)$$

где

$$\rho(X) = \sum_{i=1}^m \rho(X / q_i). \quad (5)$$

Предположим, что найденный для объекта вектор X был идентифицирован как образ состояния, принадлежащего классу q_i . В общем случае X может принадлежать любому из n рассматриваемых классов, следовательно, математическое ожидание условных средних потерь, связанных с отнесением образа X к другому классу q_j , определяется через потери λ_{ij} , обусловленные ошибочным отнесением состояния класса q_i к классу q_j :

$$r_j(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} P(q_i / X). \quad (6)$$

С учетом (6) выражение для критерия r принимает вид

$$r_j(X) = \frac{1}{\rho(X)} \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} P(q_i) \rho(X / q_i). \quad (7)$$

Общий средний риск:

$$r(X) = \frac{1}{\rho(X)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} P(q_i) \rho(X / q_i). \quad (8)$$

При распознавании каждого образа целесообразно принять решающее правило: классификатор причисляет образ X к классу, для которого минимальны условные средние потери; отсюда математическое ожидание полных потерь для всех решений также будет минимально.

При фиксированном X величина $1 / \rho(X)$ является константой, что позволяет упростить выражения (7) и (8).

С учетом изложенного формулы для вычисления условного риска средних потерь имеют вид

$$R_j(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} P(q_i) \rho(X / q_i), \quad (9)$$

$$R(X) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} P(q_i) \rho(X / q_i). \quad (10)$$

Рассмотрим важный частный случай описанного алгоритма, а именно двоичное разделение множества Q на два класса q_1 и q_2 (типа «зачет –

незачет»). С практической точки зрения важно, что решение реальных многоальтернативных задач распознавания и классификации может быть сведено к использованию ветвящихся двухальтернативных решающих правил.

В этом случае $Q = \{q_1, q_2\}$, и результатом анализа вектора X является выбор одного из двух альтернативных решений, т.е. отнесение X к классу q_1 или q_2 . Первому решению соответствует риск средних потерь

$$R_1(X) = \lambda_{11}p(X/q_1)P(q_1) + \lambda_{21}p(X/q_2)P(q_2), \quad (11)$$

а второму –

$$R_2(X) = \lambda_{12}p(X/q_1)P(q_1) + \lambda_{22}p(X/q_2)P(q_2). \quad (12)$$

В соответствии с байесовским решающим правилом образ (вектор) X приписывают к классу с минимальным значением средних потерь; поэтому образ X относят к классу q_1 , если имеет место соотношение $R_1(X) < R_2(X)$, т.е.

$$\begin{aligned} &\lambda_{11}p(X/q_1)P(q_1) + \lambda_{21}p(X/q_2)P(q_2) < \\ &< \lambda_{12}p(X/q_1)P(q_1) + \lambda_{22}p(X/q_2)P(q_2), \end{aligned} \quad (13)$$

или, в другой записи:

$$(\lambda_{12} - \lambda_{11})p(X/q_1)P(q_1) > (\lambda_{12} - \lambda_{22})p(X/q_2)P(q_2). \quad (14)$$

Из практических соображений можно положить, что $\lambda_{ij} > \lambda_{ji}$ (и даже $\lambda_{ii} = 0$). При этих условиях выражение (14) сводится к неравенству

$$\frac{p(X/q_1)}{p(X/q_2)} > \frac{P(q_1)(\lambda_{21} - \lambda_{22})}{P(q_2)(\lambda_{12} - \lambda_{11})}, \quad (15)$$

которое и задает алгоритм классификации. Левая часть неравенства (15) есть коэффициент правдоподобия:

$$l(X) = \frac{p(X/q_1)}{p(X/q_2)}, \quad (16)$$

а правая часть неравенства (15)

$$h = \frac{P(q_1)(\lambda_{21} - \lambda_{22})}{P(q_2)(\lambda_{12} - \lambda_{11})} \quad (17)$$

характеризует пороговое значение.

С учетом вышесказанного байесовское решающее правило состоит в следующем:

- при $l(X) > h$ состояние объекта относят к классу q_1 ;
- при $l(X) < h$ состояние объекта относят к классу q_2 ;

– в случае равенства $l(X) = h$ для принятия решения необходимо использовать дополнительную информацию.

Наряду с описанным правилом принятия решения может быть использован критерий максимума апостериорной вероятности. Апостериорная вероятность $P(q_i / X)$ принадлежности состояния объекта к классу q_i вычисляется следующим образом:

$$P(q_i / X) = \frac{P(X / q_i)P(q_i)}{P(X)}, \quad (18)$$

где $P(X) = \sum_{i=1}^m P(q_i)P(X / q_i)$ – совместная плотность распределения вектора признаков.

Решение о принадлежности состояния классу q_i принимается при выполнении условия, обеспечивающего минимум средней вероятности ошибки классификации.

Для двух альтернативных классов q_1 и q_2 состояние объекта идентифицируется как q_1 при $P(q_1 / X) > P(q_2 / X)$ и как q_2 при $P(q_1 / X) < P(q_2 / X)$.

При этом отношение правдоподобия определяется выражением (16), а пороговое значение в соответствии с (17) $h = P(q_2) / (q_1)$.

Величины априорных вероятностей $P(q_i)$, входящие в формулу (17), как правило, задаются на основании дополнительной информации (например, семестровый рейтинг, данные портфолио, субъективная оценка преподавателя, независимая экспертная оценка и др.). При полной априорной неопределенности, в соответствии с принципом Бернулли, можно положить $P(q_1) = P(q_2) = 1/2$ (в этом предположении пороговое значение становится равным единице $h = 1$, т.е. реализуется правило максимального правдоподобия).

Такая методика успешно реализуется в области технических систем как задача минимизации ошибок (например, в терминологии радиолокационного обнаружения типа «пропуск цели» и «ложная тревога»). В отличие от технической области, на первый план в задаче мониторинга остаточных знаний и степени сформированности компетенций ставится проблема минимизации заданной функции риска в условиях высокой сложности поведения исследуемой системы.

Заключение

В статье рассмотрена возможность применения байесовского подхода к оцениванию уровня достижения выдвинутых гипотез. Подход предполагает использование формулы Байеса для построения распределения апостериорных вероятностей на множестве гипотез о том, что степень реализации рассматриваемой гипотезы достигла требуемого уровня. Подход применим для общих практик при условии, что существуют объективные свидетельства, позволяющие произвести экспертное оценивание.

Используемые для получения байесовской оценки условные вероятности рассматриваются как экспертные оценки верности гипотез о достижении определенного уровня их выполнения.

Преимущества представленного в статье подхода, на наш взгляд, состоят в следующем:

- дана более высокая объективность экспертных оценок с учетом естественных сглаживаний, возникающих между экспертами расхождений;
- предложено упрощение процедуры оценивания по сравнению с использованием методов нечеткой логики;
- есть возможность оценивания по ограниченному набору имеющихся объективных свидетельств без ущерба для состоятельности оценок.

Рассмотренный подход может быть использован для оценивания качества управленческих решений и, в частности, в обширном классе задач анализа степени сформированности предписанных объектам мониторинга учебных и профессиональных компетенций.

Библиографический список

1. **Белашов, П. Д.** Сущность понятия «компетенция» и «компетентность» в научной литературе / П. Д. Белашов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2015. – Т. 2, № 6 (28). – С. 79–84.
2. **Гусятников, В. Н.** Построение модели для анализа качества образовательного процесса на основе технологий компьютерного тестирования / В. Н. Гусятников, О. Ю. Соколова, И. Б. Каюкова // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2009. – № 4. – С. 197–200.
3. **Беспалько, В. П.** Природосообразная педагогика / В. П. Беспалько. – М. : Народное образование, 2008. – 512 с.
4. **Растрин, Л. А.** Адаптивное обучение с моделью обучаемого / Л. А. Растрин, М. Х. Эренштейн. – Рига : Зинатне, 1986 – 160 с.
5. **Курилова, О. Л.** Методы оценки компетенций выпускника вуза / О. Л. Курилова, А. А. Смагин, С. В. Липатова // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Сер.: Математика и информационные технологии. – 2012. – № 1 (4). – С. 246–257.
6. **Цыпкин, Я. З.** Основы теории обучающих систем / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1970. – 232 с.
7. **Ивахненко, А. Г.** Самообучающиеся системы распознавания и автоматического регулирования / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наукова думка, 1969. – 134 с.
8. **Ту, Дж.** Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М. : Мир, 1980. – 411 с.

References

1. Belashov P. D. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego* [XxI century: results of the past and problems of the present]. 2015, vol. 2, no. 6 (28), pp. 79–84.
2. Gusyatnikov V. N., Sokolova O. Yu., Kayukova I. B. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo universiteta* [Bulleting of Saratov Socio-Economic University]. 2009, no. 4, pp. 197–200.
3. Bepal'ko V. P. *Prirodosobraznaya pedagogika* [Natural pedagogy]. Moscow: Narodnoe obrazovanie, 2008, 512 p.
4. Rastrigin L. A., Erenshiteyn M. Kh. *Adaptivnoe obuchenie s model'yu obuchaemogo* [Adaptive learning with a student model]. Riga: Zinatne, 1986, 160 p.

5. Kurilova O. L., Smagin A. A., Lipatova S. V. *Uchenye zapiski Ul'yanovskogo gosuniversiteta. Ser.: Matematika i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of Ulyanovsk State University]. 2012, no. 1 (4), pp. 246–257.
6. Tsipkin Ya. Z. *Osnovy teorii obuchayushchikh sistem* [Fundamentals of the theory of learning systems]. Moscow: Nauka, 1970, 232 p.
7. Ivakhnenko A. G. *Samoobuchayushchiesya sistemy raspoznavaniya i avtomaticheskogo regulirovaniya* [Self-learning systems for recognition and automatic regulation]. Kiev: Naukova dumka, 1969, 134 p.
8. Tu Dzh., Gonsales R. *Printsipy raspoznavaniya obrazov* [Principles of pattern recognition]. Moscow: Mir, 1980, 411 p.

Дементьев Евгений Александрович
студент, Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза,
ул. Гагарина/пр. Байдукова, 1а/11)
E-mail: Bfh58@mail.ru

Dement'ev Evgeniy Aleksandrovich
Student, Penza State Technological
University (1a/11 Gagarina street/
Baydukova avenue, Penza, Russia)

Кан Виталий Вячеславович
аспирант, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Гагарина/пр. Байдукова, 1а/11)
E-mail: sbl@penzgtu.ru

Kan Vitaliy Vyacheslavovich
Postgraduate student, Penza State
Technological University (1a/11 Gagarina
street/Baydukova avenue, Penza, Russia)

Свистунов Борис Львович
доктор технических наук, профессор,
кафедра физики, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Гагарина/пр. Байдукова, 1а/11)
E-mail: sbl@penzgtu.ru

Svistunov Boris L'vovich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of physics, Penza State
Technological University (1a/11 Gagarina
street/Baydukova avenue, Penza, Russia)

УДК 378.147

Дементьев, Е. А.

Принятие решений о степени сформированности профессиональных компетенций студентов на основе мониторинга остаточных знаний /
Е. А. Дементьев, В. В. Кан, Б. Л. Свистунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 64–73. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-6.

МЕТОД РЕФЛЕКСИВНОЙ САМОАДАПТАЦИИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Возрастающая динамика предметных областей и сложность соответствующего прикладного программного обеспечения порождают актуальную проблему создания универсальных методов самоадаптации программных систем без перекомпиляции исходного кода. Жизненный цикл таких программ будет гораздо длительнее и продуктивнее, а их сопровождение потребует существенно меньше времени и материальных затрат. Более того, самоадаптивные программные системы способны решать и качественно иную задачу – выявлять скрытые знания и факторы о собственной предметной области, которые на этапе проектирования приложения могут быть неизвестны даже экспертам. Целью работы является создание нового универсального метода самоадаптации программных систем, способного учитывать накопленный системой за период эксплуатации опыт и на основе данного опыта осуществлять формирование новых обратных связей.

Материалы и методы. Для реализации предложенного метода использовались технологии интеллектуального анализа данных и инженерии линеек программных продуктов, а также математический аппарат теории графов.

Результаты. К основным теоретическим результатам следует отнести: концепцию рефлексивной самоадаптации программных систем, в основе которой лежит идея формирования и встраивания в свою структуру новых обратных связей за счет интеллектуального анализа собственной поведенческой информации; универсальные архитектурные принципы построения адаптивного программного обеспечения; математическую модель рефлексии и универсальный метод рефлексивной самоадаптации программных систем, построенные на основе теории графов, технологий инженерии линеек программных и интеллектуального анализа данных и позволяющие реализовать основные положения предложенной концепции. Основным практическим результатом является разработанная адаптивная программная система в сфере образования, способная самостоятельно выявлять зависимости между результатами психологического тестирования учащегося и подходящими ему алгоритмами обучения.

Выводы. Разработанный метод самоадаптации основан на использовании технологии интеллектуального анализа данных, является универсальным и может применяться для выявления системой новых знаний о собственной предметной области в процессе эксплуатации. Показано практическое применение метода в сфере образования: создана обучающая система, способная самостоятельно выявлять зависимости между результатами психологического тестирования учащегося и подходящими ему алгоритмами обучения.

Ключевые слова: самоадаптация программного обеспечения, программная инженерия, программная кибернетика, программные системы, интеллект

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00408.

© 2018 Бождай А. С., Евсеева Ю. И. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

туальный анализ данных, инженерия линеек программных продуктов, модели изменчивости.

A. S. Bozhday, Yu. I. Evseeva

REFLEX SELF-ADAPTATION METHOD OF SOFTWARE SYSTEMS

Abstract.

Background. The increasing dynamics of subject areas and the complexity of the corresponding application software generate the actual problem of creating universal methods for self-adaptation of software systems without recompiling the source code. The life cycle of such programs will be much longer and more productive, and their support will require substantially less time and material costs. Moreover, self-adaptive software systems are able to solve a qualitatively different task - to reveal hidden knowledge and factors about their own subject area, which at the design stage of the application may not be known even by experts. The aim of the work is to create a new universal method for self-adaptation of software systems that can take into account the experience accumulated by the system during the operational period and, on the basis of this experience, to create new feedbacks.

Materials and methods. To implement the proposed method, the technologies of data mining and engineering of software product lines were used, as well as the mathematical apparatus of graph theory.

Results. The main theoretical results include: the concept of reflexive self-adaptation of software systems, which is based on the idea of the possibility of an analogy between the functioning of software and the activities of the human mind; universal architectural principles of building adaptive software; mathematical model of reflexion and a universal method of reflexive self-adaptation of software systems, based on the theory of graphs, technologies of programming lines of software and data mining and allowing to implement the main provisions of the proposed concept. The main practical result is the developed adaptive software system in the field of education, capable of independently identifying the dependencies between the results of the student's psychological testing and the training algorithms suitable to him.

Conclusions. The developed method of self-adaptation is based on the use of data mining technology, is universal and can be used to identify the system of new knowledge about its own domain in the process of operation. The practical application of the method in the sphere of education is shown: a training system has been created capable of independently identifying the dependencies between the results of the student's psychological testing and the learning algorithms suitable for him.

Key words: software self-adaptation, software engineering, program cybernetics, software systems, data mining, engineering of rulers of software product lines, variability models.

Введение

Современные прикладные программы являются сложными информационно-техническими системами, сочетающими в себе системные, инженерно-технические, математические и информационные аспекты. Сложность проектирования, реализации и сопровождения таких объектов экспоненциально растет с увеличением динамики и онтологической сложности предметных областей их использования. В ряде случаев затруднительно, а зачастую и во-

все невозможно перечислить все состояния и взаимодействия, характеризующие компоненты современного программного обеспечения (ПО).

Большинство попыток разработать универсальный аппарат для реализации адаптивного поведения в программных системах нельзя считать удачными, поскольку они предпринимались в основном специалистами-практиками для создания частных архитектурных решений, а не фундаментальных принципов, пригодных для построения широкого класса самоадаптивного ПО. К изданиям, посвященным разработке адаптивной архитектуры, относится прежде всего ряд публикаций о создании адаптивных компьютерных игр и виртуальных тренажеров [1–5]. Малочисленные работы, посвященные формализации процессов адаптации в программных системах, к сожалению, в настоящий момент не предлагают универсальных подходов. Так, широко известная концепция автономных вычислений (autonomic computing), подробно изложенная в работе [6], применима в основном для задач конфигурирования в режиме реального времени крупных программно-аппаратных комплексов. Ряд других публикаций, например работы P. Wang, K. Cai и Q. Yang, посвященные использованию нечеткой логики и конечных автоматов при проектировании адаптивных программ [7–9], или методы, основанные на агентных технологиях [10], также не являются достаточно гибкими и применимы далеко не во всех предметных областях.

Помимо структурной и поведенческой сложности, программные системы характеризуются необходимостью модификации в процессе эксплуатации. Это может быть вызвано как изменениями в предметной области системы, так и различными аппаратно-техническими, экономическими, социокультурными факторами.

Одна из ключевых проблем здесь – выявление изначально скрытых знаний о предметной области системы в течение ее жизненного цикла. Именно получение данных сведений может стать основной причиной для последующей модификации программы. В настоящее время решение задачи обнаружения знаний и последующая перестройка системы полностью лежат на плечах разработчиков, что заметно увеличивает затраты на сопровождение ПО. Кроме того, далеко не вся информация о функциональных взаимосвязях компонентов ПО и элементов предметной области может быть обнаружена человеческими усилиями. В таком случае крайне полезным решением была бы разработка новых автоматизированных методов, позволяющих решить приведенную проблему с минимальным человеческим участием.

1. Концепция рефлексии и математическая модель рефлексивной программной системы

В процессе работы над универсальным методом самоадаптации программных систем авторами предложена новая концепция самоадаптации прикладного ПО, названная концепцией рефлексивной самоадаптации или просто рефлексии. Основные положения данной концепции можно сформулировать следующим образом:

- Инвариантность к предметной области, типу и назначению программной системы.
- Масштабируемость. В процедуре рефлексии должен учитываться тот факт, что уровень организации программной системы может быть различ-

ным: от простейшей утилиты до программного комплекса на основе нескольких систем. Также необходимо учесть, что адаптироваться может как система в целом, так и отдельные ее компоненты, при этом должны использоваться одни и те же методы адаптации.

- Интеллектуальный анализ ретроспективных данных. Новые поведенческие обратные связи формируются путем выявления зависимостей и закономерностей в информации, отражающей работу программной системы на некотором временном промежутке в прошлом.

Таким образом, речь идет о некотором универсальном механизме самоадаптации программной системы, основанном на применении алгоритмов интеллектуального анализа данных для поиска недостающих знаний о предметной области и формировании на основе полученных знаний новых обратных связей.

Разработка нового метода в нашем случае подразумевает предварительное создание математической модели адаптивного поведения (рефлексии) программной системы. В качестве ядра предлагаемой модели было принято использовать аппарат моделирования изменчивости ПО [11]. Модель изменчивости представляет собой своеобразное морфологическое множество адаптивной программной системы, т.е. множество его потенциальных конфигураций.

В качестве моделей изменчивости предлагается использовать модели характеристик, в частности, их графическое представление – диаграммы характеристик (рис. 1). Диаграмма характеристик представляет собой усовершенствованное И/ИЛИ-дерево, вершинами которого являются компоненты программной системы, а связи между вершинами определяют совместимость компонентов в пределах одной конфигурации.

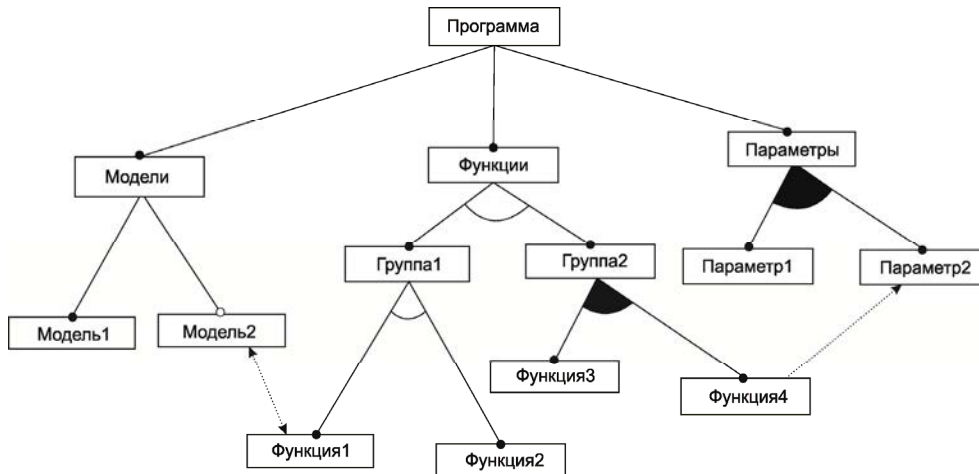


Рис. 1. Диаграмма характеристик

Формально модель характеристик представляет собой ориентированный прямой гиперграф (или F-граф)

$$F = (N, E, \Delta, \Psi), \quad (1)$$

где $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ – конечное множество вершин, каждая из которых представляет собой характеристику диаграммы; $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ – конечное множество ребер графа (отношений модели характеристик); $\Delta \in N$ – вершина, представляющая корневую характеристику диаграммы.

$\Psi: E \rightarrow M$, $M \subset N \times N$ – функция маркировки, которая присваивает значение мощности $mv(E_i) = (\min, \max) \in M$, где M – конечное множество значений мощности модели характеристик, N – конечное множество вершин гиперграфа, так что $\min, \max \in Z \wedge \min \geq 0, \max > 0, \min \leq \max \wedge \max \leq q_i$, где Z – множество целых чисел.

Рефлексивная программная система также должна иметь собственную специфическую архитектуру. Обобщая существующий опыт разработки систем с модульной архитектурой, можно сформулировать несколько важных принципов построения программных систем с рефлексивной самоадаптацией функционала:

- Минимальными компонентами программной системы, подверженными адаптации, являются блоки изменчивости. Каждый блок изменчивости, входящий в состав системы, отвечает за возможную реализацию какого-либо атомарного компонента программы (функции, класса, модели объекта предметной области и т.п.).
 - Совокупность логически связанных блоков изменчивости, относящихся к одной предметной области и предназначенной для решения одной задачи, называется рефлексивным компонентом.
 - Рефлексивная программная система может состоять из одного или нескольких рефлексивных компонентов. Их количество будет определять адаптивное разнообразие и рефлексивную сложность программы.
 - Рефлексивные компоненты объединены в единую систему посредством общего интерфейса и изначально могут не иметь данных друг о друге. Однако в процессе рефлексивного анализа будет происходить выявление степени и характера влияния одних компонентов на другие. Для этого необходимо предусмотреть каналы информационного обмена между компонентами.
- Формально блоку изменчивости соответствует следующее определение:

$$V_B = (SubF, BlockParams, BlockStates, Rule), \quad (2)$$

где $SubF$ – гиперграфовое представление модели характеристик блока изменчивости, который может описывать адаптивное поведение отдельного компонента либо целостной системы; $BlockParams = \{BlockParam_1, BlockParam_2, \dots, BlockParam_k\}$ – множество параметров, влияющих на состояние блока; $BlockStates = \{BlockState_1, BlockState_2, \dots, BlockState_z\}$ – множество состояний блока, при этом $BlockState_i \subseteq SubF \forall i = 1, \dots, z$; $Rule: BlockParams' \rightarrow BlockStates$ – функция, ставящая в соответствие каждому элементу множества $BlockParams'$ некоторый элемент множества $BlockStates$. Множество $BlockParams'$ представляет собой множество подмножеств $BlockParams$.

Множество влияющих параметров $BlockParams$ можно также представить следующим образом:

$$BlockParams = ExtParams \cup InnerParams \cup TargetParams, \quad (3)$$

где $ExtParams = \{ExtParam_1, ExtParam_2, \dots, ExtParam_{k1}\}$ – множество внешних по отношению к рассматриваемому блоку параметров; $InnerParams = \{InnerParam_1, InnerParam_2, \dots, InnerParam_{k2}\}$ – множество внутренних варьируемых параметров блока; $TargetParams = \{TargetParams_1, TargetParams_2, \dots, TargetParams_{k3}\}$ – множество целевых параметров. Элементы множества $TargetParams$, как правило, связаны с некоторыми целевыми функциями и определяются (в отличие от других подмножеств множества $Params$) экспертным путем.

Изменчивость всех архитектурных уровней рефлексивной программной системы будет описываться единой математической моделью:

$$V_E = (F, V_{BS}, States, GenStates, Trans), \quad (4)$$

где F – гиперграфовое представление модели изменчивости рассматриваемого архитектурного уровня; $V_{BS} = \{V_{B1}, V_{B2}, \dots, V_{Br}\}$ – множество блоков изменчивости архитектурного уровня; $States = \{State_1, State_2, \dots, State_f\}$ – множество состояний архитектурного уровня, при этом $State_i \subseteq F \forall i = 1, \dots, f$; $GenStates: GenParams, F \rightarrow NewState$ – функция генерации нового состояния $NewState \subseteq F$ на основе множества параметров $GenParams = \bigcup_{i=1}^r ExtParam_i$, где r – число точек вариации рассматриваемого архитектурного элемента, и гиперграфа F ; $Trans: TransParams, MX \rightarrow States$ – функция перехода системы в состояние $State_i \subseteq F \forall i = 1, \dots, f$ на основе множества влияющих на смену состояния параметров $TransParams = GenParams$ и матрицы переходов MX .

Можно выделить следующие базовые архитектурные уровни рефлексивной системы:

1. Уровень компонентов.
2. Уровень внутрисистемный (межкомпонентный).
3. Уровень межсистемный.

На межсистемном уровне рассматривается взаимное влияние полностью самостоятельных программных систем друг на друга. В таком случае объектом рефлексии является некоторая метасистема, в которой рассматриваемые самостоятельные системы будут выполнять роль подсистем.

Первый и второй уровни будут описываться математической моделью в соответствии с формулой (4). Таким образом, общая математическая модель рефлексивной системы будет иметь следующий вид:

$$MS = \{S_1, S_3, S_3, \dots, S_i\}, i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где MS – метасистема как совокупность отдельных систем S_i .

При этом каждая система S_i описывается моделью изменчивости в соответствии с формулой (4), где F – гиперграфовое представление диаграммы характеристик, вершинами которой являются компоненты i -й системы.

В свою очередь каждый из компонентов i -й системы также описывается формулой (4), но в случае с компонентами F в качестве вершин будет включать в себя непосредственно элементы программного приложения (функции, объекты классов, модели, алгоритмы и т.д.).

2. Метод рефлексивной самоадаптации программной системы

Основное назначение предлагаемого метода – формирование функции *Rule* для последующего выбора необходимой конфигурации путем оценки множества *ExtParams*. Метод включает в себя следующие основные этапы:

1. Определение множеств *ExtParams*, *InnerParams* и *TargetParams*. Осуществляется вручную разработчиком или экспертом.
2. Задание условий для целевых параметров *TargetParams*. Также осуществляется вручную.
3. Определение количества (в процентах) оставляемых на пятом этапе метода значений. Осуществляется вручную.
4. Сбор системой информации о собственном функционировании на определенном временном промежутке (осуществляется автоматически). Выходные данные этапа организуются в виде таблицы, первые несколько столбцов которой представляют собой *ExtParams*, а в последующих содержатся *InnerParams* и *TargetParams*.
5. Обработка записей в таблице. Оставляются только те записи, в которых значения *TargetParams* удовлетворяют целевым функциям. Для решения задачи можно использовать алгоритм кластеризации. Выходными данными этапа является таблица записей без столбцов с *TargetParams*.
6. Использование алгоритма интеллектуального анализа данных для получения зависимостей между *ExtParams* и *InnerParams*. Может использоваться один из следующих алгоритмов [12]:
 - а) кластеризация;
 - б) ассоциативные правила;
 - в) деревья решений;
 - г) нейронная сеть.
7. Формирование функции $Rule: BlockParams' \rightarrow BlockStates$ на основе проведенного анализа. По сути, *Rule* будет представлять собой функцию-обертку над функцией, возвращаемой алгоритмом Data Mining. Ее назначение – подавать на вход сформированной функции анализа множество *ExtParams* и на основе получаемых выходных значений формировать подграф из множества *BlockStates*.

3. Практическое приложение разработанного метода

Предложенный метод может быть эффективен не только для обнаружения информационных взаимосвязей в рамках функционирования одной системы, но и для выявления скрытых закономерностей в данных, которыми обмениваются различные системы (и, таким образом, выявления потенциального влияния одной системы на другую).

В качестве примера рассмотрим две программные системы, применяемые в сфере образования. Назначение одной – непосредственное обучение

учащихся с помощью различных методик. Так, курс математики может быть подан в чисто абстрактной форме, а может использовать и различные визуальные вспомогательные средства. Назначение другой системы – предварительное психологическое тестирование учащегося с целью выявления доминантных личностных свойств.

Система тестирования в качестве основного метода определения основного рисунка личности использует Миннесотский многоаспектный личностный опросник, или MMPI (англ. Minnesota Multiphasic Personality Inventory) – личностный опросник, разработанный в конце 1930-х – начале 1940-х гг. в Университете Миннесоты Старком Хатуэйем и Джоном МакКинли. MMPI – наиболее изученная и одна из самых популярных психодиагностических методик, предназначенная для исследования индивидуальных особенностей и психических состояний личности. Широко применяется в клинической практике [13].

MMPI включает в себя 14 базовых шкал (10 клинических и 4 оценочных) [13]:

1. Шкала ипохондрии (HS) определяет «близость» обследуемого к астено-невротическому типу личности.

2. Шкала депрессии (D) предназначена для определения степени субъективной депрессии, морального дискомфорта (гипотимический тип личности).

3. Шкала истерии (Hy) разработана для выявления лиц, склонных к невротическим реакциям конверсионного типа (использование симптомов физического заболевания в качестве средства разрешения сложных ситуаций).

4. Шкала психопатии (Pd) направлена на диагностику социопатического типа личности.

5. Шкала маскулинности – феминности (Mf) – предназначена для измерения степени идентификации обследуемого с ролью мужчины или женщины, предписываемой обществом.

6. Шкала паранойи (Pa) – позволяет судить о наличии «сверхценных» идей, подозрительности (паранойальный тип личности).

7. Шкала психастении (Pt) – устанавливает сходство обследуемого с больными, страдающими фобиями, навязчивыми действиями и мыслями (тревожно-мнительный тип личности).

8. Шкала шизофрении (Sc) – направлена на диагностику шизоидного (аутического) типа личности.

9. Шкала гипомании (Ma) – определяет степень «близости» обследуемого гипертимному типу личности.

10. Шкала социальной интроверсии (Si) диагностирует степень соответствия интровертированному типу личности. Клинической шкалой не является, добавлена в опросник в ходе его разработки.

11. Шкала «?» – шкалой может быть названа условно, так как не имеет относящихся к ней утверждений. Регистрирует количество утверждений, которые обследуемый не смог отнести ни к «верным», ни к «неверным».

12. Шкала «лжи» (L) предназначена для оценки искренности обследуемого.

13. Шкала достоверности (F) создана для выявления недостоверных результатов (связанных с небрежностью обследуемого), а также аггравации и симуляции.

14. Шкала коррекции (K) введена для того, чтобы сгладить искажения, вносимые чрезмерной недоступностью и осторожностью обследуемого.

В то же время система обучения предлагает три возможных варианта обучения математике в средней школе:

- 1) абстрактный вариант (без вспомогательных визуальных методов);
- 2) графический вариант (со множеством дополнительных иллюстраций и конкретных примеров);
- 3) смешанный вариант.

Фрагмент диаграммы характеристик блока изменчивости обучающего приложения, отвечающего за выбор варианта обучения, представлен на рис. 2.

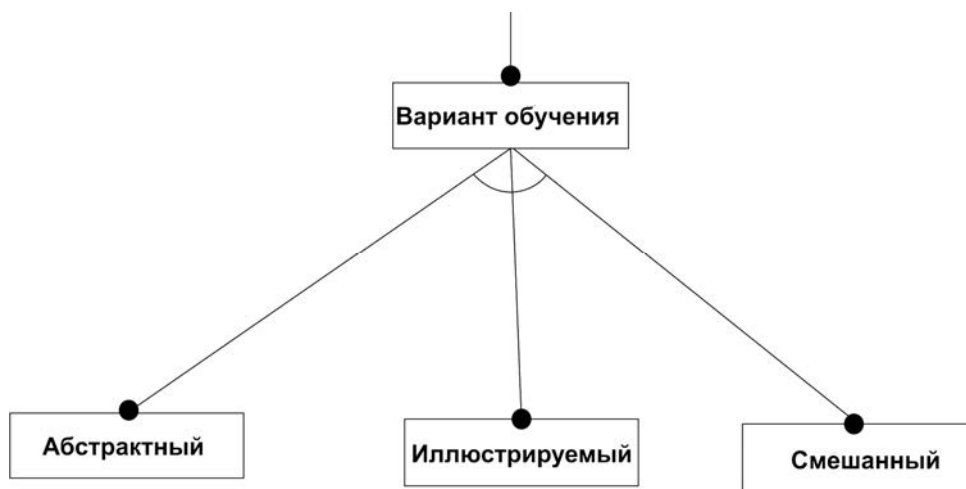


Рис. 2. Варианты обучения

Целью процедуры рефлексивного анализа в данном случае будет являться установление зависимости между значениями клинических шкал ММПИ и наиболее подходящей стратегией обучения.

Множество параметров блока изменчивости *BlockParams* представлено на рис. 3, из которого видно, что значения клинических шкал ММПИ входят в множество *ExtParams*, возможный вариант обучения образует множество *InnerParams*, а множество *TargetParams* включает в себя время, затрачиваемое на процесс обучения, и число ошибок, полученных при тестировании знаний.

Данные для рефлексивного анализа собираются в таблицу, столбцы которой представляют элементы множества *BlockParams*. Фрагмент таких данных показан в табл. 1.

В конкретном случае нас интересуют те записи, в которых значения времени и числа ошибок будут малыми. Было принято решение отбирать 20 % записей с малыми значениями.

Значения клинических шкал ММПИ в диапазоне 50–60 баллов относятся к «среднему» коридору нормы, в диапазоне 40–50 – к «нижнему» коридору

нормы, в диапазоне 60–70 – к «верхнему». Шкалы со значениями в области 60–80 баллов можно считать представляющими акцентуированные черты личности (при этом значение в диапазоне 70–80 баллов отвечает за явную акцентуацию), а значения выше 80 баллов говорят либо о соответствующих психопатических чертах [13], либо о наличии психоза (например, шизофренического психоза в случае с явно повышенной шкалой Sc) или тяжелого невроза (например, истерического расстройства в случае со значительным повышением Hy).

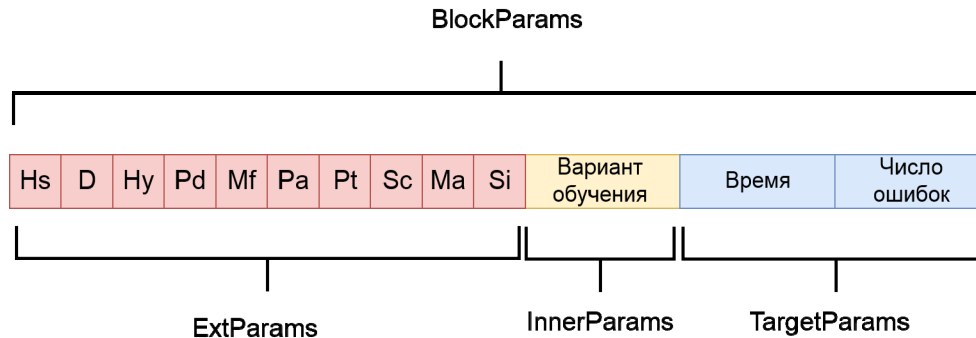


Рис. 3. Множество *BlockParams*

Следует отметить, что в случае с методикой ММРІ изолированные значения шкал не представляют существенного интереса и ни о чем важном могут не говорить. Следует рассматривать именно совокупность пиков различных клинических шкал, формирующих так называемый рисунок личности. Именно взаимосвязь между рисунком личности и подходящим вариантом обучения и должна обнаружить процедура рефлексии.

Множество возможных состояний блока изменчивости *BlockStates* будет содержать три элемента, т.е. три подграфа исходного графового представления изображенной на рис. 2 модели изменчивости *F*. Каждый подграф будет включать соответствующую стратегию обучения.

Таблица 1

Фрагмент массива данных для рефлексивного анализа

Hs	D	Hy	Pd	Mf	Pa	Pt	Sc	Ma	Si	Вариант обучения	Время	Число ошибок
52	60	53	57	55	56	60	60	51	60	0	10	1
55	55	62	54	52	52	51	55	60	52	0	14	3
51	53	51	50	57	55	48	54	55	58	0	12	2
65	75	65	85	60	88	79	90	70	81	0	20	7
48	51	66	56	60	56	52	59	60	54	1	11	1
67	77	57	53	56	59	70	61	59	70	1	15	4
72	91	83	82	70	96	88	98	92	98	1	22	10
46	60	56	45	62	40	60	53	50	58	1	12	2
58	46	58	62	50	67	55	40	58	67	2	15	3
46	63	59	53	67	53	58	60	45	67	2	16	3
63	56	58	53	56	59	64	77	67	64	2	17	4
87	118	80	70	65	92	100	115	60	65	2	21	8

Для анализа применялся алгоритм поиска ассоциативных правил Apriori. Полученные зависимости выглядят следующим образом:

1. Если $Hu \in [60;80]$, то наиболее выгодной является визуальная стратегия обучения.

2. Если $Sc \in [60;80]$ или $Pt \in [60;80]$, то наиболее выгодной является абстрактная стратегия обучения.

Таким образом, для лиц, демонстрирующих выраженные истероидные черты, будет выбираться визуальная стратегия обучения, а для лиц с шизоидным или психастеническим складом – абстрактная стратегия. Полученная зависимость согласуется с принятым в клинической психологии убеждением, что лица шизоидного склада имеют более развитое абстрактное мышление и склонны к работе с информацией, отвлеченной от конкретики и повседневности, а развитое образное мышление истероидов требует больше визуального материала [13].

Заключение

Разработанный метод рефлексивной самоадаптации программных систем является универсальным и масштабируемым, позволяет находить зависимости как в рамках одной системы, так и во взаимодействиях между различными системами. Это позволит программному обеспечению совершенствоваться на протяжении жизненного цикла без привлечения специалистов в области программирования [14]. Помимо метода, значимыми теоретическими результатами работы также являются формулировка базовых принципов концепции рефлексивной самоадаптации программных систем; универсальные архитектурные принципы построения адаптивного программного обеспечения; математическая модель рефлексии, используемая в предложенном методе. К основному практическому результату следует отнести разработанную адаптивную программную систему в сфере образования, способную самостоятельно выявлять зависимости между результатами психологического тестирования учащегося и подходящими ему алгоритмами обучения.

Библиографический список

1. **Hogg, C.** Game AI for domination games / C. Hogg и др. // Artificial intelligence for computer games / под ред. P. A. Gonzalez-Galero, M. A. Gomez-Martin. – New York : Springer, 2011. – С. 83–101.
2. **Wang, A. L.** Software architectures and the creative processes in game development / A. L. Wang, N. Nordmark // Entertainment computing / ed. by K. Chorianopoulos et al. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – P. 272–285.
3. **Riener, R.** Virtual reality in medicine / R. Riener, M. Harders. – London : Springer London, 2012. – 294 p.
4. **Harris, A.** Simulation and training in minimal access surgery / A. Harris, F. Bello, R. Kneebone // Training in minimal access surgery / ed. by N. Francis et al. – London : Springer London, 2015. – P. 35–47.
5. **Torbeyns, J.** Describing and studying domain-specific serious games / J. Torbeyns, E. Lehtinen, J. Elen. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – 250 p.
6. **Ahuja, K.** Autonomic Computing: An emerging perspective and issues / K. Ahuja, H. Dangey // IEEE International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT 2014). – Washington : IEEE Computer Society, 2014. – P. 471–475.

7. **Wang, P.** Representing extended finite state machines for SDL by a novel control model of discrete event systems / P. Wang, K. Y. Cai // Sixth IEEE International Conference on Quality Software (QSIC 2006). – Washington : IEEE Computer Society, 2006. – P. 159–166.
8. **Wang, P.** Supervisory control of a kind of extended finite state machines / P. Wang, K. Y. Cai // 24th IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – Washington : IEEE Computer Society, 2012. – P. 775–780.
9. **Yang, Q.** Fuzzy control-based software self-adaptation: A case study in mission critical systems / Q. Yang, J. Lu, J. Xing, X. Tao, H. Hu, Y. Zou // IEEE 35th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW). – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 13–18.
10. **Sim, K. M.** Agent-based cloud computing / K. M. Sim // IEEE Transactions on Services Computing. – Washington : IEEE Computer Society, 2012. – P. 564–567.
11. **Schobbens, P. E.** Feature diagrams: a survey and formal semantics / P. E. Schobbens, P. Heymans, J. C. Trigaux // In 14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06). – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 139–148.
12. **Барсегян, А.** Анализ данных и процессов / А. Барсегян, М. Куприянов, И. Холод, М. Тесс, С. Елизаров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 314 с.
13. **Собчик, Л.** СМЛ. Стандартизированный многофакторный метод исследования личности / Л. Собчик. – СПб. : Речь, 2000. – 219 с.
14. **Бершадский, А. М.** Разработка и моделирование гетерогенных инфраструктур для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга / А. М. Бершадский, А. Г. Финогеев, А. С. Бождай // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1. – С. 36–46.

References

1. Hogg C. et al. *Artificial intelligence for computer games*. New York: Springer, 2011, pp. 83–101.
2. Wang A. L., Nordmark N. *Entertainment computing*. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 272–285.
3. Riener R., Harders M. *Virtual reality in medicine*. London: Springer London, 2012, 294 p.
4. Harris A., Bello F., Kneebone R. *Training in minimal access surgery*. London: Springer London, 2015, pp. 35–47.
5. Torbeyns J., Lehtinen E., Elen J. *Describing and studying domain-specific serious games*. Cham: Springer International Publishing, 2015, 250 p.
6. Ahuja K., Dangey H. *IEEE International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT 2014)*. Washington: IEEE Computer Society, 2014, pp. 471–475.
7. Wang P., Cai K. Y. *Sixth IEEE International Conference on Quality Software (QSIC 2006)*. Washington: IEEE Computer Society, 2006, pp. 159–166.
8. Wang P., Cai K. Y. *24th IEEE Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Washington: IEEE Computer Society, 2012, pp. 775–780.
9. Yang Q., Lu J., Xing J., Tao X., Hu H., Zou Y. *IEEE 35th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 13–18.
10. Sim K. M. *IEEE Transactions on Services Computing*. Washington: IEEE Computer Society, 2012, pp. 564–567.
11. Schobbens P. E., Heymans P., Trigaux J. C. *In 14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 139–148.

12. Barsegyan A., Kupriyanov M., Kholod I., Tess M., Elizarov S. *Analiz dannykh i protsessov* [Data and process analysis]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2009, 314 p.
13. Sobchik L. *SMIL. Standartizirovanny mnogofaktornyy metod issledovaniya lichnosti* [Standardized multifactor method of personality research]. Saint-Petersburg: Rech', 2000, 219 p.
14. Bershadskiy A. M., Finogeev A. G., Bozhday A. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 1, pp. 36–46.

Бождай Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра систем автоматизированного
проектирования, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: bozhday@yandex.ru

Bozhday Aleksandr Sergeevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of CAD systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Евсеева Юлия Игоревна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра систем автоматизированного
проектирования, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: shymoda@mail.ru

Evseeva Yuliya Igorevna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of CAD systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 004.4

Бождай, А. С.

Метод рефлексивной самоадаптации программных систем /
А. С. Бождай, Ю. И. Евсеева // Известия высших учебных заведений. По-
волжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 74–86. – DOI
10.21685/2072-3059-2018-2-7.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.391:621.396.96

DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-8

Д. И. Попов

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ РЕЖЕКТОРНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются режекторные фильтры (РФ) рекурсивного и нерекурсивного типа, а также каскадное соединение рекурсивных и нерекурсивных звеньев. Целью работы является сравнительный анализ различных РФ в зависимости от формы и ширины спектра пассивных помех.

Материалы и методы. Введены критерии эффективности режектирования пассивных помех фильтрами рекурсивного и нерекурсивного типа в зависимости от формы спектральной плотности помехи. Рассмотрены критерии и методы оптимизации режекторных фильтров при априорной неопределенности параметров и формы спектральной плотности помехи.

Результаты. Приведены числовые результаты сравнительного анализа эффективности РФ различной структуры по введенным критериям при воздействии помех с различными аппроксимациями спектральной плотности, отличающимися друг от друга скоростью спада спектра.

Выводы. Гауссовской аппроксимации спектральной плотности пассивных помех соответствует наиболее эффективное их режектирование, что обусловлено особенностями формы спектра. Гауссовская аппроксимация характеризуется наибольшей чувствительностью к параметрам режекторных фильтров при анализе их эффективности, что обуславливает целесообразность ее использования при сравнительном анализе различных типов режекторных фильтров.

Ключевые слова: аппроксимация спектральной плотности, гауссовский спектр, баттервортовский спектр, критерий эффективности режектирования, корреляционная матрица, методы оптимизации, нерекурсивный фильтр, пассивные помехи, рекурсивный фильтр, сравнительный анализ эффективности РФ.

Д. И. Попов

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE PASSIVE HINDRANCES' SUPPRESSION WITH RECTOR FILTERS

© 2018 Попов Д. И. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The object of the research are rejection filters (RF) of recursive and non-recursive type, as well as a cascade connection of recursive and nonrecursive links. The aim of the work is a comparative analysis of different RFs depending on the shape and width of the clutter spectrum.

Materials and methods. Criteria for the efficiency of clutter rejection by filters of recursive and non-recursive type are introduced depending on the form of the spectral density of the clutter. The criteria and methods for the optimization of rejection filters are considered for a priori uncertainty of the parameters and the shape of the spectral density of the clutter.

Results. Numerical results of a comparative analysis of the RF efficiency of different structures on the imposed criteria under the influence of clutter with various spectral density approximations differing from each other in the rate of spectrum decay are presented.

Conclusions. The Gaussian approximation of the spectral density of clutter corresponds to the most effective rejection, which is due to the features of the shape of the spectrum. The Gaussian approximation is characterized by the greatest sensitivity to the parameters of the rejection filters when analyzing their efficiency, which makes it expedient to use it in a comparative analysis of different types of rejection filters.

Key words: spectral density approximation, Gaussian spectrum, Butterworth spectrum, rejection efficiency criterion, correlation matrix, optimization methods, non-recursive filter, clutter, recursive filter, comparative analysis of RF efficiency.

Введение

Обнаружение сигналов движущихся целей на фоне пассивных (коррелированных) помех является одной из актуальных и трудных задач, решаемых в когерентно-импульсных радиолокационных системах [1–3]. Пассивные помехи в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов – местных предметов, гидрометеоров (облаков, дождя, града, снега), металлизированных отражателей, сбрасываемых для маскировки цели и др. – существенно нарушают нормальную работу радиолокационных систем [4, 5]. Интенсивность пассивных помех может значительно превышать уровень собственных шумов приемника, что приводит к перегрузкам приемного тракта («ослеплению» радиолокатора) и, как следствие, к потере полезных сигналов. Однако даже при отсутствии перегрузок полезный сигнал может быть не обнаружен на фоне интенсивных мешающих отражений.

Основной операцией выделения сигналов движущихся целей является режектирование спектральных составляющих помехи, а режекторные фильтры (РФ) являются основным узлом широкого класса систем межпериодной обработки радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех и в значительной мере определяют эффективность данных систем. На практике получили применение РФ рекурсивного и нерекурсивного типа, а также каскадное соединение рекурсивных и нерекурсивных звеньев. Несмотря на наличие ряда работ, посвященных описанию РФ и анализу их эффективности [6–8], исчерпывающие результаты по их сравнительному анализу отсутствуют. В связи с этим представляет интерес проведение анализа эффективности различных РФ в зависимости от формы и ширины спектра пассивных помех. Кроме того, для адекватного решения поставленной задачи сравнительного анализа необходимо ввести критерий эффективности, усредненный по спектральным характеристикам пассивных помех.

1. Описание РФ в z-плоскости

Системная (передаточная) функция рекурсивного РФ m -го порядка в z -плоскости имеет вид [6]

$$H(z) = \frac{\prod_{j=1}^m (z - z_{0j})}{\prod_{j=1}^m (z - z_{pj})} = \frac{\sum_{k=0}^m a_k z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^m b_k z^{-k}}, \quad (1)$$

где z_{0j} , z_{pj} – нули и полюсы системной функции; a_k , b_k – весовые коэффициенты соответственно прямых и обратных связей канонической структуры РФ.

В результате деления полинома в числителе выражения (1) на полином в знаменателе получим $H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} g_k z^{-k}$, где g_k – коэффициенты импульсной характеристики РФ, определяемые из рекурсивных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= a_0, \quad g_k = a_k + \sum_{j=1}^k b_j g_{k-j}, \\ \text{а при } k > m \quad g_k &= \sum_{j=1}^m b_j g_{k-j}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для нерекурсивного РФ m -го порядка, нули которого расположены на единичной окружности z -плоскости, системная функция принимает вид

$$H(z) = \prod_{j=1}^m (1 - z^{-1} e^{i\theta_{0j}}) = \sum_{k=0}^m g_k z^{-k},$$

где θ_{0j} – аргумент j -го комплексного нуля $z_{0j} = e^{i\theta_{0j}}$; g_k – коэффициенты импульсной характеристики нерекурсивного РФ, которые, как следует из соотношений (2), при $b_k = 0$ являются весовыми коэффициентами a_k при канонической реализации РФ.

2. Критерии эффективности режектирования пассивных помех

Эффективность рассматриваемых РФ при гауссовской статистике входных данных будем характеризовать коэффициентом улучшения отношения сигнал/(помеха+шум):

$$\mu(\varphi) = \mathbf{G}^T \mathbf{R}_c \mathbf{G} / [\mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G}], \quad (3)$$

где $\mathbf{G} = \{g_k\}^T$ – n -мерный вектор-столбец коэффициентов импульсной характеристики РФ, причем для рекурсивных РФ величина n соответствует достижению установившегося режима на выходе РФ, а для нерекурсивных

РФ $n = m + 1$; $\mathbf{R}_c$ – n -мерная эрмитова корреляционная матрица сигнала, элементы которой $R_{jk}^c = r_{jk} e^{i(j-k)\varphi}$; φ – доплеровский сдвиг фазы сигнала за период повторения T ; $\mathbf{R}_n$ – корреляционная матрица помехи, элементы которой при скомпенсированном доплеровском сдвиге фазы помехи $R_{jk}^n = r_{jk}$; γ – отношение шум/помеха по мощности; $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

С учетом инвариантности параметров РФ к величине φ путем интегрирования выражения (3) найдем среднее в интервале $(-\pi, \pi)$ значение величины $\mu(\varphi)$:

$$\mu = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \mu(\varphi) d\varphi = \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{R}}_c \mathbf{G} / \mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G},$$

где $\tilde{\mathbf{R}}_c$ – преобразованная в результате интегрирования корреляционная матрица сигнала, элементы которой $\tilde{R}_{jk}^{(c)} = r_{jk} \text{sinc}[(j-k)\pi] = \delta_{jk}$, что с учетом свойства sinc-функции

$$\text{sinc}[(j-k)\pi] = \frac{\sin[(j-k)\pi]}{(j-k)\pi} = \begin{cases} 1, & j = k, \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$$

соответствует единичной матрице, т.е. $\tilde{\mathbf{R}}_c = \mathbf{I}$.

В результате диагонализации корреляционной матрицы сигнала выражение (3) окончательно принимает вид, соответствующий нормированному относительно прохождения некоррелированного шума коэффициенту подавления помехи:

$$\mu = \mathbf{G}^T \mathbf{G} / \mathbf{G}^T (\mathbf{R}_n + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{G} = [(\mathbf{G}^T \mathbf{R}_n \mathbf{G} / \mathbf{G}^T \mathbf{G}) + \gamma]^{-1}. \quad (4)$$

Оптимизация рекурсивных РФ по заданным коэффициенту μ и корреляционным свойствам помехи при заданной (или выбранной) аппроксимирующей функции для амплитудно-частотной характеристики сводится к выбору оптимальных параметров последней (частоты среза и неравномерности в полосе пропускания) и связанных с ними весовых коэффициентов РФ в результате применения итерационной процедуры поиска экстремума [9].

Оптимизация нерекурсивных РФ по критерию $\mu_{\max} \rightarrow \max_{\mathbf{G}} \mu$ осуществляется методами линейной алгебры на основе экстремальных свойств собственных значений матриц, что приводит к оптимальному вектору $\mathbf{G}$ в виде собственного вектора матрицы $\mathbf{R}_n$, соответствующего ее минимальному собственному значению [10].

При известной форме спектральной плотности помехи оптимальный вектор $\mathbf{G}$ определяется ее нормированной шириной $\beta = \Delta f T$, которая при параметрической априорной неопределенности является неизвестной. При заданном интервале изменения параметра β оптимальный вектор $\mathbf{G}$ в отличие от рассмотренного критерия предлагается выбирать из условия максимизации усредненной величины

$$\bar{\mu} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \mu(\beta) p(\beta) d\beta, \quad (5)$$

где $\beta_{\min}$, $\beta_{\max}$ – границы интервала изменения параметра β ; $p(\beta)$ – плотность вероятности распределения параметра β , которая в отсутствие априорных данных может быть выбрана равномерной в пределах интервала $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$, т.е. $p(\beta) = 1 / \Delta\beta$.

Ввиду разнообразия помеховых ситуаций форма спектральной плотности помехи также является неизвестной, что приводит к использованию различных ее аппроксимаций. В этом случае при оптимизации вектора $\mathbf{G}$ следует использовать величину

$$\bar{\mu} = \sum_{l=1}^L p_l \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \mu(\beta_l) p(\beta_l) d\beta_l, \quad (6)$$

где L – число рассматриваемых аппроксимаций спектральной плотности помехи; p_l – вероятностная мера l -й аппроксимации, задаваемая по результатам экспериментальных исследований спектральных характеристик пассивных помех.

Оптимизация вектора $\mathbf{G}$ по предложенному критерию $\bar{\mu}_{\max} \rightarrow \max_{\mathbf{G}} \bar{\mu}$ осуществляется методами нелинейного программирования, например, с использованием квазиньютоновской итерационной процедуры поиска унимодального экстремума [11].

3. Модели пассивных помех

В результате решения задачи оптимизации устанавливается связь оптимального вектора $\mathbf{G}$ с различными аппроксимациями формы спектральной плотности помехи, отличающимися друг от друга скоростью спада спектра. Наиболее быстрым спадом спектра обладает кривая Гаусса. Далее в порядке уменьшения скорости спада следуют кривые Баттерворта второй степени и первой степени (резонансная кривая). Соответствующие аналитические выражения в том же порядке записываются следующим образом [7]:

$$\begin{cases} S_1(f) = \exp[-2,8(f / \Delta f)^2], \\ S_2(f) = [1 + (2f / \Delta f)^4]^{-1}, \\ S_3(f) = [1 + (2f / \Delta f)^2]^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Конкретный вид элементов корреляционной матрицы $\mathbf{R}_{\Pi}$ в выражении (4) зависит от спектральной плотности помехи и определяется соотношением

$$\rho_{jk} = \int_0^{\infty} S(f) \cos[2\pi f(j-k)T] df / \int_0^{\infty} S(f) df. \quad (8)$$

В результате вычисления интегралов в данном соотношении с использованием приведенных выше аппроксимаций спектральной плотности помехи соответственно получим

$$\begin{cases} \rho_{jk}^{(1)} = \exp[-\pi^2 \beta^2 (j-k)^2 / 2,8], \\ \rho_{jk}^{(2)} = \exp(-\pi \beta |j-k|/\sqrt{2}) [\sin(\pi \beta |j-k|/\sqrt{2}) - \cos(\pi \beta |j-k|/\sqrt{2})], \\ \rho_{jk}^{(3)} = \exp(-\pi \beta |j-k|). \end{cases} \quad (9)$$

Так как гауссовская и резонансная аппроксимации спектральной плотности помехи соответствуют предельным случаям быстрого и медленного спада спектра, то для описания помех с быстрым спадом спектра в центре и медленным на краях целесообразно использовать взвешенную сумму данных аппроксимаций. Тогда

$$\rho_{jk} = \alpha \rho_{jk}^{(1)} + (1-\alpha) \rho_{jk}^{(3)}, \quad (10)$$

где весовой коэффициент α принимает значение от 0 до 1.

Варьирование параметров α и β открывает широкие возможности для описания помех с различной формой и шириной спектра.

4. Результаты расчетов

Ниже приведены числовые результаты сравнительного анализа эффективности РФ различной структуры по критерию (4) при воздействии рассмотренных типов помех. Приведенные на рис. 1, 2 номера кривых соответствуют номерам аппроксимаций спектральной плотности $S_1(f)$, $S_2(f)$ и $S_3(f)$ по формулам (7) и полученным из них с помощью соотношения (8) коэффициентам корреляции $\rho_{jk}^{(1)}$, $\rho_{jk}^{(2)}$ и $\rho_{jk}^{(3)}$ по формулам (9). Во всех случаях параметр $\gamma = 10^{-4}$.

На рис. 1 приведены зависимости эффективности режектирования для установившегося режима рекурсивного РФ чебышевского типа второго порядка ($m=2$) с весовыми коэффициентами прямых связей $a_0 = a_2 = 1$, $a_1 = -2$ и неравномерностью в полосе пропускания 3 дБ. Сплошные кривые соответствуют РФ с угловой частотой среза полосы пропускания $\theta_c = \omega_c T = 0,6\pi$ и весовыми коэффициентами обратных связей $b_1 = -0,75$, $b_2 = -0,5$, а штриховые кривые – $\theta_c = 0,5\pi$ и $b_1 = -0,25$, $b_2 = -0,5$. Как видим, эффективность РФ существенно зависит от скорости спада и ширины спектра помехи. Наиболее эффективное режектирование помехи имеет место в случае гауссовской аппроксимации, которая характеризуется быстрым спадом спектра. Кроме того, эффективность рекурсивного РФ зависит от угловой частоты среза θ_c полосы пропускания, причем в большей степени также в случае гауссовского спектра. Очевидно, что при аппроксимации коэффициентов корреляции помехи в виде взвешенной суммы (10) эффективность РФ в зависимости от величины весового коэффициента α соответствует промежу-

точному между кривыми 1 и 3 положению. При $\beta \rightarrow 0$ во всех случаях, как это следует из критерия (4), эффективность РФ $\mu \rightarrow \gamma^{-1}$.

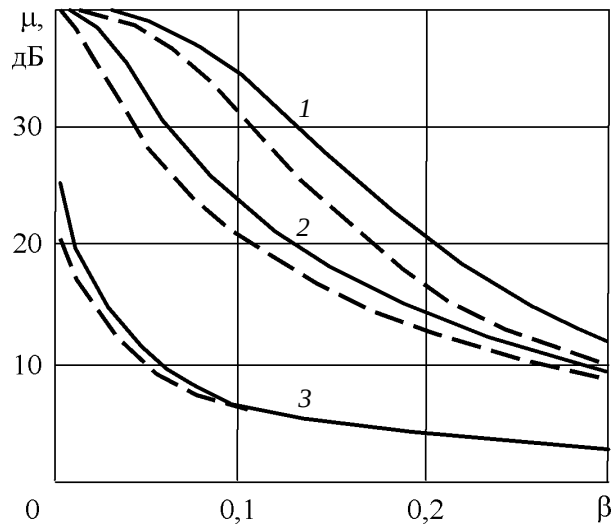


Рис. 1. Зависимости эффективности режектирования для РФ второго порядка от параметра помехи

На рис. 2 приведены зависимости эффективности РФ третьего порядка ($m = 3$). Сплошные кривые соответствуют каскадному соединению нерекурсивного звена первого порядка и рекурсивного звена второго порядка с частотой среза $\theta_{\text{н}} = 0,6\pi$, штриховая кривая – нерекурсивному РФ третьего порядка с оптимизированными по критерию максимума величины (5) в практически интересующем интервале изменения $\beta = 0,05 \dots 0,2$ весовыми коэффициентами $a_0 = -a_3 = 1$, $a_1 = -a_2 = -2,93$.

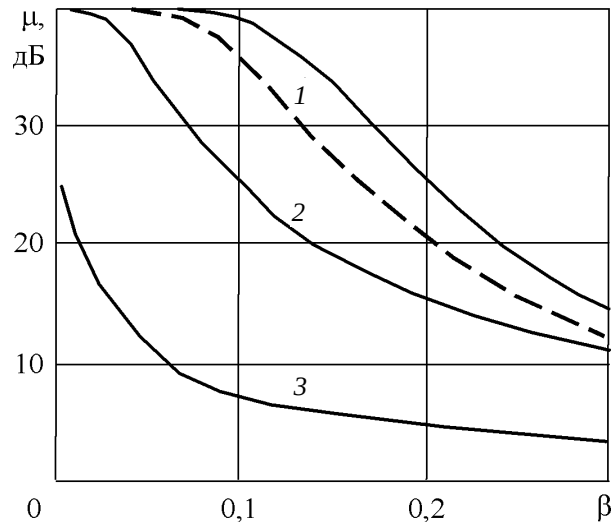


Рис. 2. Зависимости эффективности режектирования для РФ третьего порядка от параметра помехи

Как следует из расчетов, введение нерекурсивного звена первого порядка приводит к повышению эффективности только при гауссовском спектре помехи. При баттервортовских аппроксимациях первой и второй степени эффективность обоих РФ третьего порядка практически одинакова, а эффективность нерекурсивного РФ третьего порядка при всех аппроксимациях практически эквивалентна эффективности рекурсивного РФ второго порядка с частотой среза $\theta_c = 0,6\pi$ (сплошные кривые на рис. 1).

Заключение

Таким образом, гауссовской аппроксимации спектральной плотности пассивных помех соответствует наиболее эффективное их режектирование, что обусловлено быстрым спадом спектра. При этом гауссовская аппроксимация характеризуется наибольшей чувствительностью к параметрам режекторных фильтров при анализе их эффективности, что обуславливает целесообразность ее использования при сравнительном анализе систем выделения сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех с различными типами режекторных фильтров.

Библиографический список

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. – 3rd ed. – New York : McGraw–Hill, 2008. – 1352 p.
2. **Richards, M. A.** Principles of Modern Radar: Basic Principles / eds. M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm. – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2010. – 924 p.
3. **Попов, Д. И.** Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособие / Д. И. Попов. – Рязань : Изд-во РГРТУ, 2011. – 80 с.
4. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques / eds. W. L. Melvin, J. A. Scheer. – New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. – 846 p.
5. **Richards, M. A.** Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M. A. Richards. – New York : McGraw–Hill Education, 2014. – 618 p.
6. **Кузьмин, С. З.** Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
7. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура : монография / под ред. Г. В. Зайцева. – М. : Радиотехника, 2015. – 376 с.
8. **Лозовский, И. Ф.** Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора : монография / И. Ф. Лозовский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – 270 с.
9. **Уайлд, Д. Дж.** Методы поиска экстремума : пер. с англ. / Д. Дж. Уайлд. – М. : Наука, 1967. – 268 с.
10. **Гантмахер, Ф. Р.** Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1988. – 552 с.
11. **Химмельблау, Д.** Прикладное нелинейное программирование : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 536 с.

References

1. *Radar Handbook*. Ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. New York: McGraw–Hill, 2008, 1352 p.
2. Richards M. A., Scheer J. A., Holm W. A. (Eds.) *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010, 924 p.
3. Popov D. I. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Statistical theory of radio systems: tutorials]. Ryazan: Izd-vo RGRTU, 2011, 80 p.

4. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. Eds. W. L. Melvin, J. A. Scheer. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
5. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw-Hill Education, 2014, 618 p.
6. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital radar. Introduction to theory]. Kiev: KViTs, 2000, 428 p.
7. *Tsifrovaya obrabotka signalov v mnogofunktsional'nykh radiolokatorakh. Metody. Algoritmy. Apparatura: monografiya* [Digital signal processing in multi-function radars. Methods. Algorithms. Equipment: monograph]. Ed. by G. V. Zaytsev. Moscow: Radio-tehnika, 2015, 376 p.
8. Lozovskiy I. F. *Tsifrovaya obrabotka signalov v RLS obzora: monografiya* [Digital signal processing in the radar review: monograph]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016, 270 p.
9. Uayld D. Dzh. *Metody poiska ekstremuma: per. s angl.* [Extremum search methods: translated from english]. Moscow: Nauka, 1967, 268 p.
10. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow: Nauka, 1988, 552 p.
11. Khimmel'blau D. *Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye: per. s angl.* [Applied non-linear programming: translated from english]. Moscow: Mir, 1975, 536 p.

Попов Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра радиотехнических систем,
Рязанский государственный
радиотехнический университет
(Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

Popov Dmitriy Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of radio engineering
systems, Ryazan State Radio Engineering
University (59/1 Gagarina street,
Ryazan, Russia)

УДК 621.391:621.396.96

Попов, Д. И.

Анализ эффективности подавления пассивных помех режекторными фильтрами / Д. И. Попов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 87–95. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-8.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621

DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-9

А. Е. Зверовщиков, Б. В. Соловков, Е. А. Зверовщиков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛИ ИЗ ТЕРМОПЛАСТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАЛИВКИ В САЕ-СИСТЕМЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является технология изготовления деталей на термопластавтоматах. Предмет исследования – влияние параметров процесса впрыска материала на качество формы и поверхности изделия. Цель работы – оптимизация технологических параметров для исключения брака изделий без проведения экспериментальных работ.

Материалы и методы. Применено компьютерное моделирование в САЕ-системах на основе метода конечных элементов. Оптимизация выполнена с использованием последовательной стратегии симплекс-поиска.

Результаты. Разработана компьютерная модель сборочного узла пресс-формы с использованием объемных конечных элементов. Определены режимы работы термопластавтомата, обеспечившие отсутствие бракованной продукции.

Выводы. Разработанная методика дает возможность без проведения экспериментальных исследований повысить качество изделий на существующих пресс-формах, обладающих недостатками конструкции. Также возможно с высоким уровнем достоверности прогнозировать уровень качества изделий при проектировании пресс-форм.

Ключевые слова: термопласт, пресс-форма, литье под давлением, температура, отклонения формы.

A. E. Zverovshchikov, B. V. Solovkov, E. A. Zverovshchikov

PERFECTION OF THE OPERATION MODES OF FORMING DETAILS FROM THERMOPLAST BASED ON MODELING THE FILLING PROCESS IN THE CAE-SYSTEM

Abstract.

Background. The object of research is the technology of manufacturing parts on injection molding machines. The subject of the study is the influence of the parameters of the material injection process on the quality of the shape and surface of the

© 2018 Зверовщиков А. Е., Соловков Б. В., Зверовщиков Е. А. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

product. The purpose of the work is the optimization of technological parameters for the elimination of rejects of products without conducting experimental works.

Materials and methods. Computer modeling in CAE-systems based on the finite element method was applied. The optimization is performed using a sequential search simplex strategy.

Results. A computer model of a mold assembly using a three-dimensional finite element is developed. The modes of operation of the automatic thermoplastic were determined, which ensured the absence of defective products.

Conclusions. The developed technique makes it possible to improve the quality of products on existing molds with design flaws without carrying out experimental studies. It is also possible to predict the level of product quality with the high level of reliability when designing molds.

Key words: thermoplastic, mold, injection molding, temperature, shape deviation.

Введение

Изготовление детали из термопластических материалов требует разработки технологической оснастки, основой которой является пресс-форма в которой происходит формообразование. Сложность формы изготавливаемой детали коррелирует с вероятностью ошибок в проектировании. Основные ошибки проектирования проявляются в появлении типовых видов брака, таких как коробление детали, появление зон утяжки и непролива, воздушных пузырей.

Процесс литья под давлением характеризуется высокими скоростями прессования, турбулентным, струйчатым и даже капельным движением полимерной смеси и соответственно захватом воздуха из полости формы во внутрь отливки. Образование пузырьков воздуха происходит в период заполнения полости формы расплавом. Характер заполнения зависит от давления литья, т.е. скорости струи полимера в момент выхода из питателя и удара о стержень или стенку, от соотношения толщин питателя и отливки, от температурных условий в форме, от физических свойств заливаемого материала. Для предотвращения подобных ошибок необходима проверка как конструкции формообразующих элементов пресс-формы, так и режимов формования. Поскольку экспериментальная проверка подобных процессов трудоемка и дорогостояща, сопряжена с повторным изготовлением оснастки, а расчет классическими аналитическими методами практически невозможен, целесообразно ее проведение при помощи моделирования в CAE-системах [1].

При анализе методом конечных элементов на первом этапе необходимо создание геометрической 3D-модели изделия и пресс-формы. Это обеспечивается современным уровнем проектирования оснастки практически в любой CAD-системе. Надежность и адекватность последующего анализа проектных разработок зависит от ряда факторов моделирования. При подготовке моделирования процесса заливки для изделия авиапромышленности «накладка» в CAD Powershare выполнена твердотельная модель (рис. 1,а).

Разбиение модели на конечные элементы (мэшинг) является ответственным этапом, во многом определяющим адекватность моделирования в целом. В CAE-модуле *Plastics* системы *Solid Works* были выбраны объемные конечные элементы тетраэдральной формы. *Solid Works Plastics* автоматически задает тип элемента, который позволяет проводить тепловые расчеты,

моделировать теплообмен и теплопередачу, пригоден для моделирования пластических деформаций. Прочностной расчет, упругое деформирование при исследованиях проводить не планировалось.

На основе анализа элементов геометрии модели детали «накладка» принято решение ограничить предельный размер конечного элемента величиной 2 мм. Это обеспечило приемлемую точность и адекватность результатов расчета и в то же время позволило решить задачу моделирования в приемлемые сроки на имеющихся вычислительных ресурсах. Поэтому конечным результатом мешинга объема изделия было формирование сетки с приемлемой однородностью размеров и форм конечных элементов (рис. 1, б).

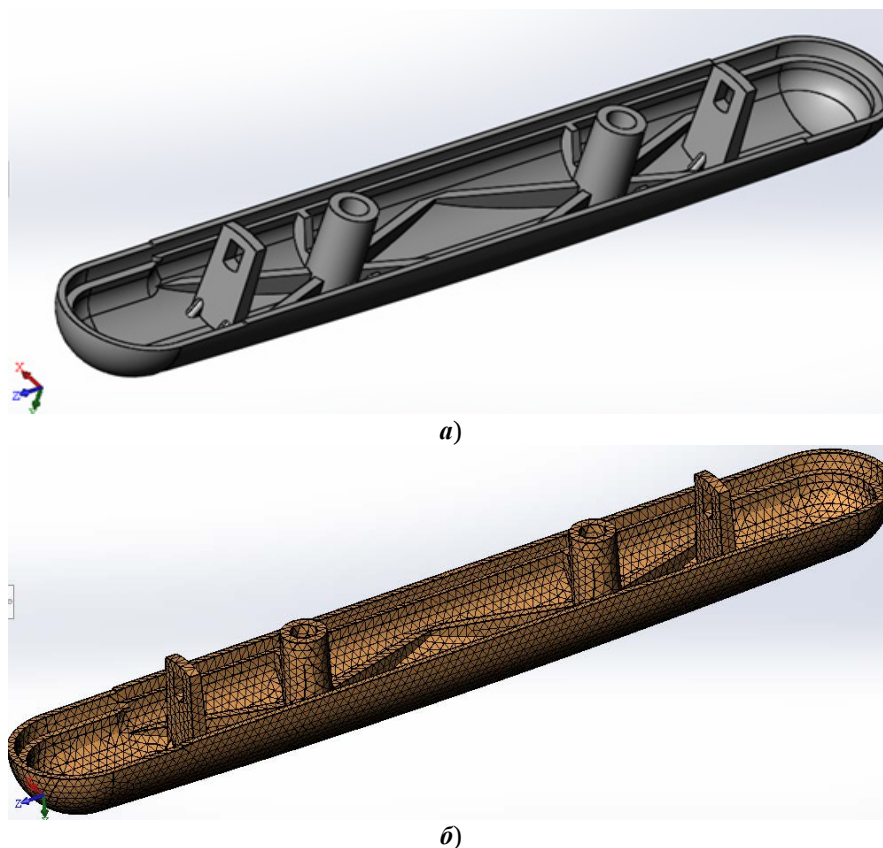


Рис. 1. Результат 3D-моделирования изделия «накладка»:
а – модель; б – сетка конечных элементов

1. Процесс моделирования и поиск оптимальных режимов литья под давлением методом симплекс-планирования

Для детали «накладка» первоначально разработана конструкция пресс-формы (рис. 2), которая включает в себя комплект плит 1, механизм для извлечения знаков, формообразующие элементы 3, выталкиватели 6, знаки 7, направляющие и крепежные изделий. Для моделирования обязательно наличие литниковой системы с определенными размерами и конфигурацией. Эти параметры определялись опытом конструктора. Для изделия в систему включены втулка литника 5 и втулка выталкивателя 4.

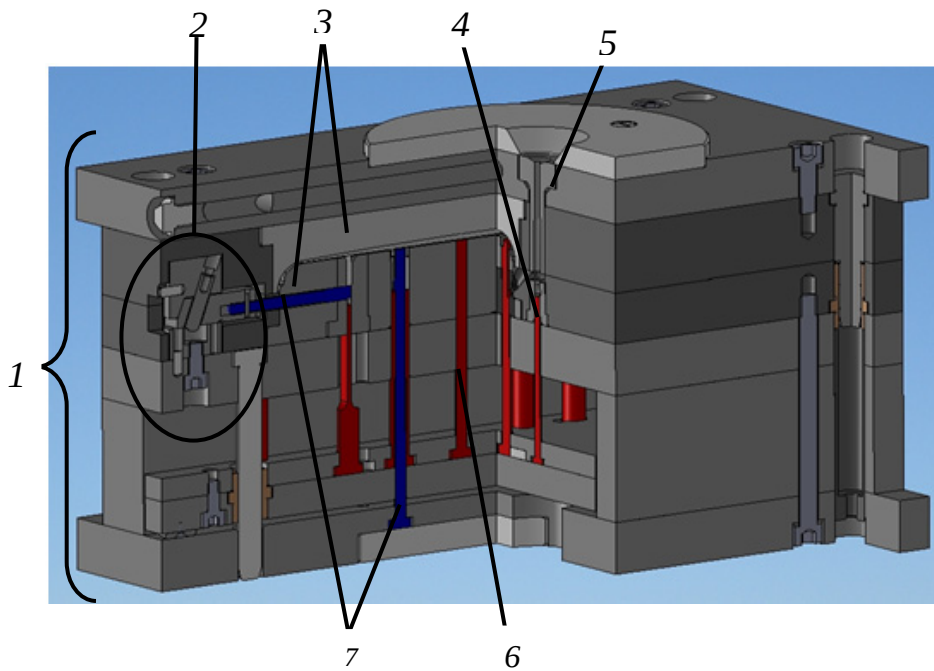


Рис. 2. 3D-модель конструкции пресс-формы для изделия «накладка»

Изготовление пробной партии изделий «накладка» сопровождалось высоким процентом бракованных деталей. Наличие усадки в ряде зон изделия превышало допустимые отклонения профиля поверхности, заданные техническими требованиями.

Причинами недопустимой неравномерности усадки, возникновения утяжин (углубления, вмятины) на поверхности литевых деталей являются как особенности конструкции изделия (зоны существенного изменения сечения детали, толщины слоев материала), так и технологические факторы: недостаточное давление формования, чрезмерная температура формы, избыточно высокая температура расплава ПМ.

Исправление ситуации было возможно либо корректировкой режимов процесса, либо изменением конструкции пресс-формной оснастки.

При выборе стратегии поиска режимов процесса впрыска наиболее эффективной стратегией в данной ситуации оказался метод последовательного симплекс-поиска. Поскольку основными управляемыми факторами процесса литья являются температура расплава $t_{рп}$, температура пресс-формы $t_{пф}$ и давление $P_{рп}$, было принято решение при постановке оптимизационного виртуального эксперимента методом симплекс-планирования [2] построить двухкоординатное пространство по факторам: температура пресс-формы $t_{пф}$ и давление $P_{рп}$ (рис. 3). Температура расплава имеет незначительный диапазон варьирования для рассматриваемого материала изделия, поэтому решено было принять ее в качестве постоянной величины $t_{рп}=198\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, по технологическим соображениям принято решение первоначально двигаться в двухфакторном пространстве по факторам: температура пресс-формы $t_{пф}$ и давление $P_{рп}$. Построение регулярных симплексов было признано нецелесо-

образным, а в стратегию расчета координат следующей точки симплекса вводились поправки, связанные с априорной оценкой нелинейности влияния исследуемых факторов на параметр оптимизации.

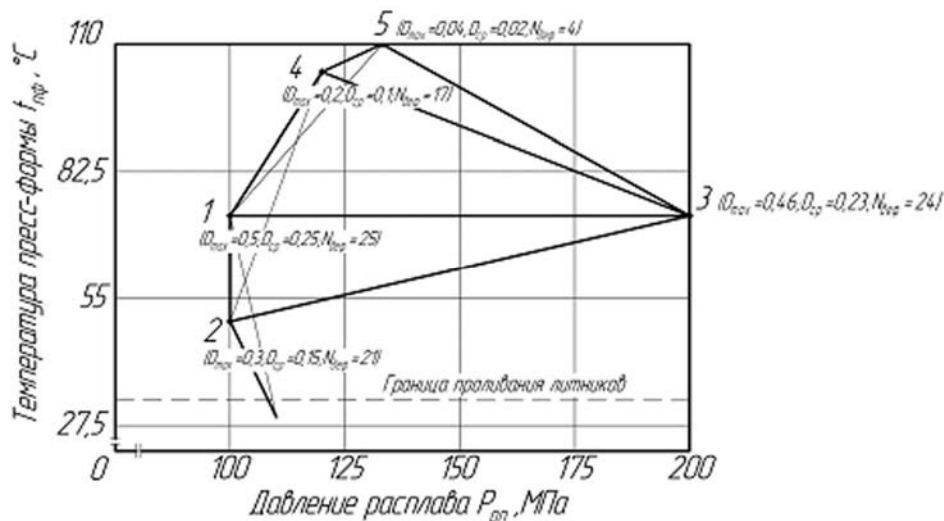


Рис. 3. Область двухкоординатного факторного пространства для симплекс-поиска

В качестве параметра оптимизации были приняты глубина дефектов, размер и расположение дефектных зон усадки. Размер зон определялся по количеству перемещенных узлов модели. Расположение дефектных зон оценивалось визуально и представляло собой качественный фактор. Можно отметить высокий уровень корреляции между глубиной и размером дефектных зон, характеризовавшийся коэффициентом корреляции 0,82 [2], при практически линейной характеристике корреляции. Также при моделировании обращалось внимание на время заполнения формы и стеклования, которые играли роль граничных условий, определяющих время технологического цикла и, соответственно, себестоимость изделия. Измерения глубины дефектов и оценка размеров дефектных зон выполнялась на ZEISS PRISMO Navigator.

Моделирование выполнялось в CAE-модуле SolidWorks Plastics Advancedc использованием модулей SimpoeWorks MFG и TOOL. Граничными условиями являлись возможности технологического оборудования.

Термопласт – автомат марки SOUND FTM220A, развивает максимальное давление 220 МПа и обеспечивает температуру до 250 °С. Изделие по техническим условиям должно быть изготовлено из материала ABS30FR. Была принята гипотеза, что из материалов базы модуля Plastics Advancedc, пригодных для моделирования процесса литья, наиболее приемлемым является материал ABS+PVC с некоторыми корректировками его физико-механических характеристик. Для моделирования основными исходными данными, характеризующими материал изделия ABS+PVC, были приняты температура плавления 198 °С, теплопроводность 0,22 Вт/(м·К), вязкость $2.33 \cdot 10^{12}$ Пас.

В качестве начальной точки поиска проведения виртуального эксперимента были приняты режимы, соответствующие технологии изготовления

партии изделий с браком, а именно $t_{rp} = 198^\circ\text{C}$, $t_{пф} = 74^\circ\text{C}$ и $P_{rp} = 100\text{ МПа}$. Это позволило оценить адекватность моделирования, сопоставив значения глубин дефектов и других параметров оптимизации по результатам моделирования в CAE-системе и по реальному состоянию изделия.

Моделирование в исходной точке показало, что при времени стеклования 21,48 с, времени заполнения 2,04 с изделие имеет такие дефекты, как утяжины (вмятины) (рис. 4,а), усадка (рис. 4,б), пузырьки воздуха (рис. 4,в).

Рассмотрение дефектов на реальном изделии (рис. 5) показало приемлемую корреляцию глубины дефектов, расположения, формы и размеров дефектных зон. Расчет по коэффициенту Стьюдента позволил установить, что средние размеры дефектных зон и глубина дефектов на реальных деталях адекватны результатам моделирования с доверительной вероятностью $P = 0,8$.

По результатам моделирования в исходной точке максимальная глубина дефектов составила 0,5 мм, средняя глубина дефектных зон 0,25 мм. Недопустимое смещение имели несколько групп 25 элементов.

Для построения второй точки нерегулярного симплекса было принято решение провести (см. рис. 3) моделирование при $t_{пф} = 50^\circ\text{C}$, $P_{rp} = 100\text{ МПа}$, $t_{rp} = 198^\circ\text{C}$.

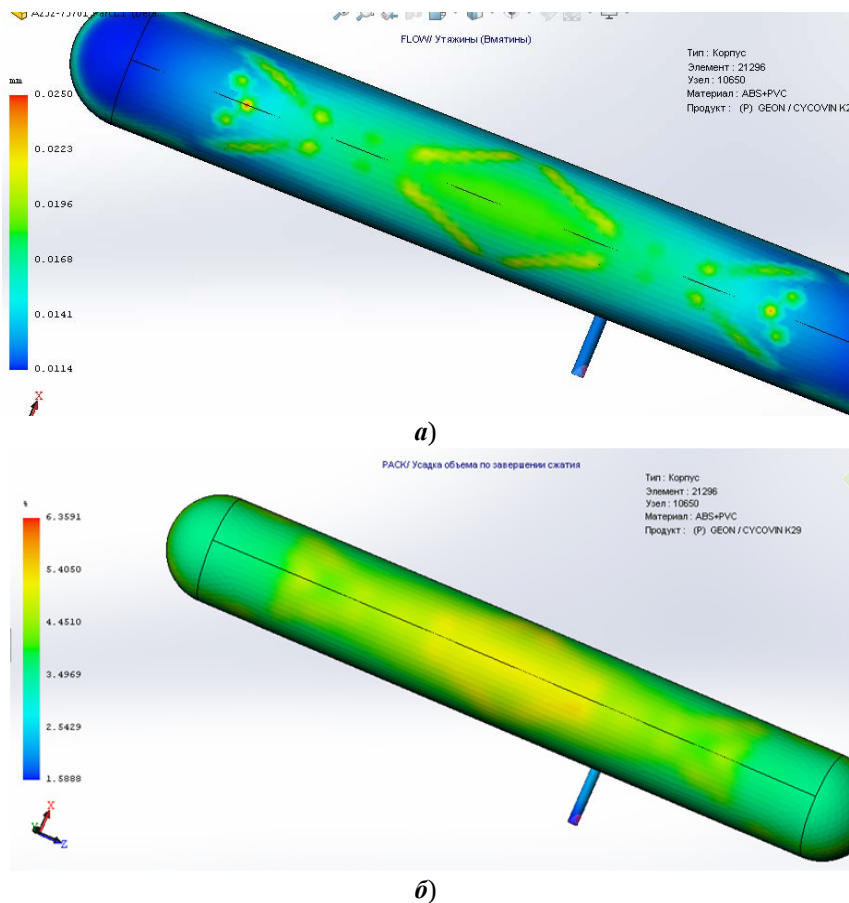
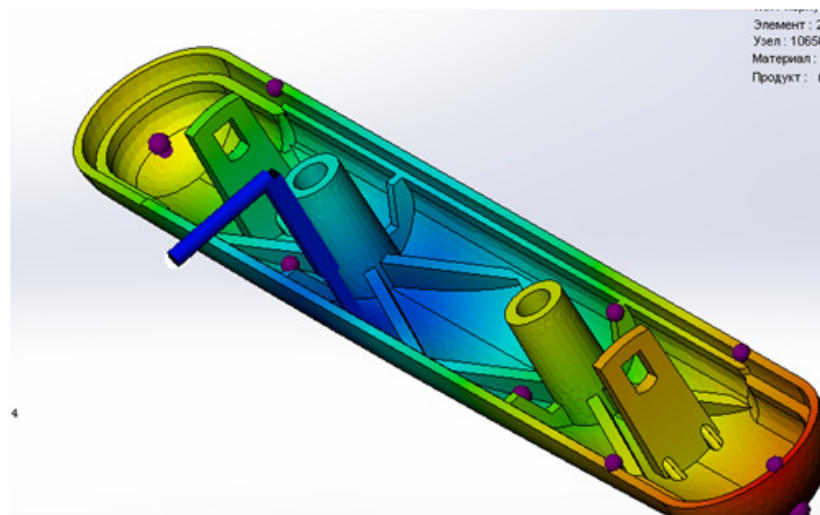


Рис. 4. Результаты моделирования в исходной точке симплекса ($t_{rp} = 198^\circ\text{C}$, $t_{пф} = 74^\circ\text{C}$ и $P_{rp} = 100\text{ МПа}$): а – утяжины (вмятины); б – усадка; в – пузырьки воздуха



в)

Рис. 4. Окончание



Рис. 5. Внешний вид изделия с дефектами поверхности, характерными для технологических параметров процесса, соответствующих исходной точке симплекса ($t_{рп} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{пф} = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P_{рп} = 100\text{ МПа}$)

Снижение температуры пресс-формы теоретически обеспечивает меньший перепад температур при стекловании и, соответственно, меньшую усадку. Действительно, такой подход обеспечил (рис. 6) благоприятную динамику стеклования, уменьшение размеров и глубины дефектных зон было незначительным, а количество воздушных дефектов увеличилось. Хотя средняя глубина дефектных зон составила 0,15 мм, максимальная глубина дефектов 0,3 мм, размеры дефектной зоны остались прежними, недопустимое смещение имели 24 элемента.

Третья точка симплекса для более полного охвата факторного пространства построена с максимально возможным значением давления впрыска $P_{рп} = 200\text{ МПа}$ и температурой пресс-формы $t_{пф} = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ и показала некоторое ухудшение изделия по всем параметрам дефектов в 1,4–1,7 раза.

В полученном симплексе предполагаемая новая точка находилась за границей допустимой температуры литниковой системы, поэтому было

принято решение сместиться в направлении повышения температуры пресс-формы.

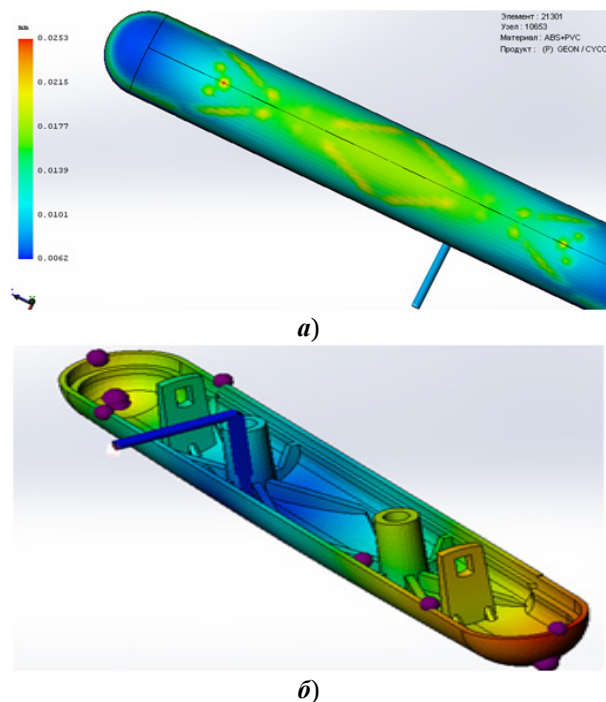


Рис. 6. Результаты моделирования во второй точке симплекса ($t_{пф} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{рп} = 100\text{ МПа}$, $t_{рп} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$): *а* – утяжины (вмятины); *б* – воздушные дефекты

В таких условиях принято решение о построении четвертой точки нерегулярного симплекса отбрасыванием второй точки и смещением положения новой точки от симметричного симплекса по фактору давления.

Четвертая точка симплекса построена со снижением давления $P_{рп} = 120\text{ МПа}$ и повышением температуры пресс-формы до $t_{пф} = 104\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты (рис. 7) показали, что размеры дефектов при таких параметрах формообразования значительно уменьшились, но по прежнему не находятся в пределах допуска.

После отбрасывания наихудшего результата построена пятая точка симплекса с повышением давления $P_{рп} = 135\text{ МПа}$, увеличением температуры пресс-формы до максимально возможного значения, $t_{пф} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные результаты (рис. 8) показали, что размеры дефектов при таких параметрах формообразования резко уменьшились и находятся в пределах допуска, оговоренного техническими требованиями на изделие.

Средняя глубина дефектных зон составила $0,02\text{ мм}$, максимальная глубина дефектов $0,04\text{ мм}$. Размеры дефектной зоны были сведены к погрешности расчета, поскольку только четыре элемента модели имели недопустимое смещение.

Технологический процесс литья был перестроен в соответствии с предложенными режимами, соответствующими пятой точке симплекса, изготовлена партия изделий «накладка». Технический контроль подтвердил годность всех изделий партии.

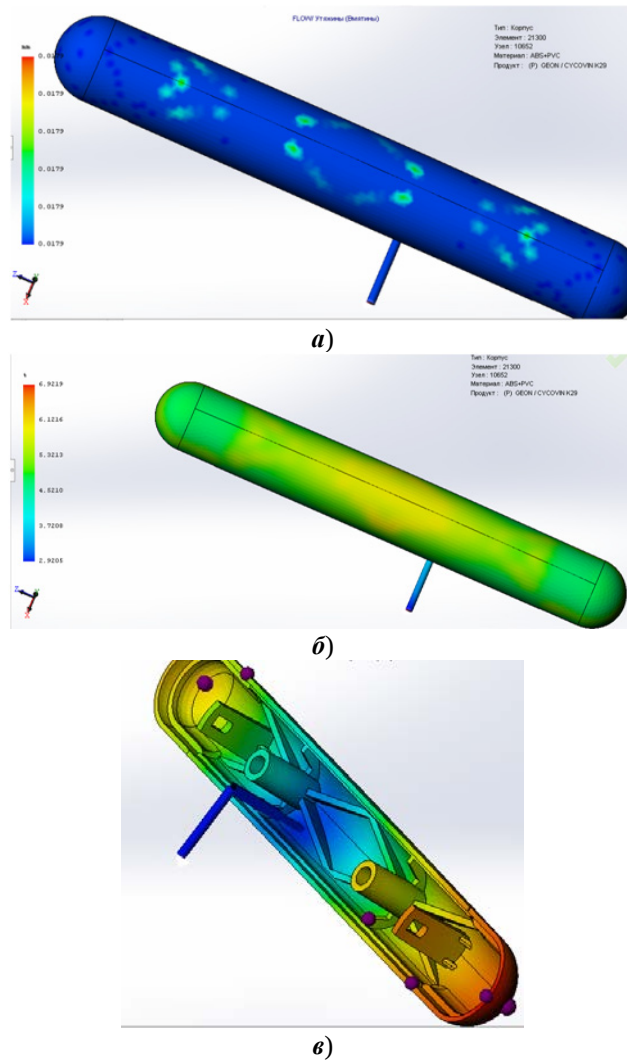


Рис. 7. Результаты моделирования в четвертой точке симплекса при $t_{\text{пф}} = 104\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{рп}} = 120\text{ МПа}$, $t_{\text{рп}} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$: **а** – утяжины (вмятины); **б** – усадка; **в** – пузырьки воздуха

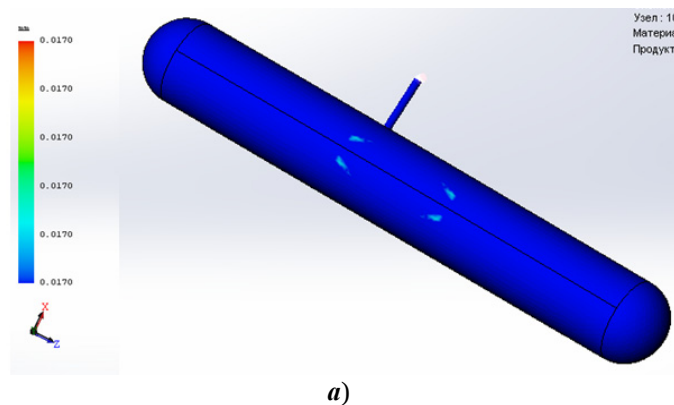


Рис. 8. Результаты моделирования при $t_{\text{пф}} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{рп}} = 135\text{ МПа}$, $t_{\text{рп}} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$: **а** – утяжины (вмятины); **б** – усадка; **в** – пузырьки воздуха

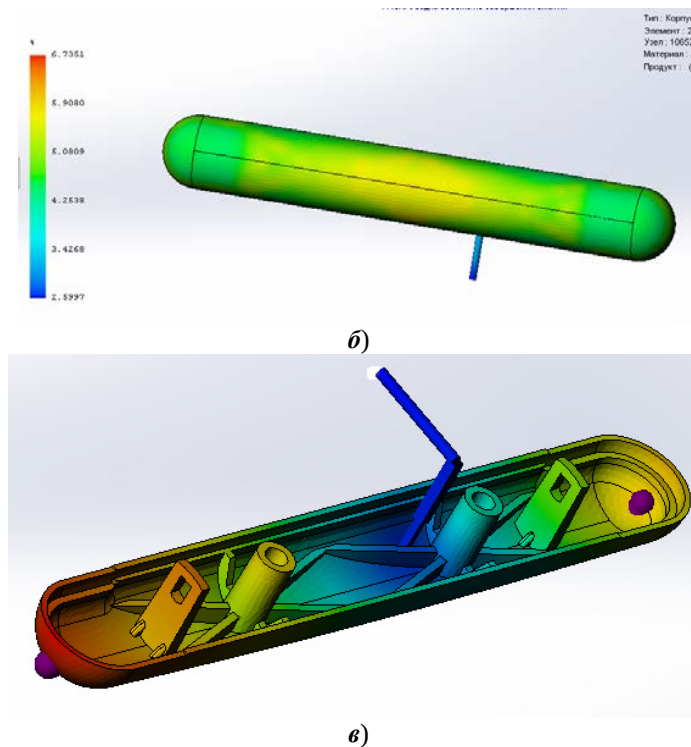


Рис. 8. Окончание

Таким образом, оптимизация технологических режимов, проведенная симплекс-методом с использованием моделирования в *CAE*-системе процесса формообразования термопластичного материала, позволила избежать значительного количества брака, предотвратить дорогостоящее изменение пресс-формной оснастки, сократить сроки и стоимость технологической подготовки производства.

Библиографический список

1. **Нестеров, С. А.** Проектирование конструкции пресс-формы для изделий из алюминиевых сплавов с использованием *CAD*-систем / С. А. Нестеров, А. И. Шакурский, Н. В. Сорокина, А. А. Конюхов, Р. Р. Акчурин // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами *CAD/CAM/CAE/PDM*: сб. ст. XI Междунар. науч.-пр. конф. – Пенза : ПДЗ, 2017. – С. 14–17.
2. **Зверовщиков, А. Е.** Экспериментальные исследования технологических процессов машиностроительных производств / А. Е. Зверовщиков, А. Н. Машков. – Пенза : ПДЗ, 2012. – 156 с.

References

1. Nesterov S. A., Shakurskiy A. I., Sorokina N. V., Konyukhov A. A., Akchurin R. R. *Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM: sb. st. XI Mezhdunar. nauch.-pr. konf.* [Design, simulation, preproduction and project management systems CAD/CAM/CAE/PDM: proceedings of XI International scientific and practical conference]. Penza: PDZ, 2017, pp. 14–17.

2. Zverovshchikov A. E., Mashkov A. N. *Eksperimental'nye issledovaniya tekhnologicheskikh protsessov mashinostroitel'nykh proizvodstv* [Experimental studies of technological processes of machine-building production] Penza: PDZ, 2012, 156 p.
-

Зверовщиков Александр Евгеньевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Соловков Борис Викторович
магистрант, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: lxlpnzacul@yandex.ru

Зверовщиков Евгений Александрович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ezwer@mail.ru

Zverovshchikov Aleksandr Evgen'evich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Solovkov Boris Viktorovich
Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Zverovshchikov Evgeniy Aleksandrovich
Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of mechanical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621

Зверовщиков, А. Е.

Совершенствование режимов операции формования детали из термопласта на основе моделирования процесса заливки в САЕ-системе /
А. Е. Зверовщиков, Б. В. Соловков, Е. А. Зверовщиков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 96–106. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-9.

И. А. Казанцев, В. И. Бычков, А. И. Казанцев

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРШНЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются поршни двигателей внутреннего сгорания. Предметом исследования является процесс получения защитных покрытий на поршнях микродуговым оксидированием. Цель работы – установление влияния теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Материалы и методы. При проведении исследований и разработке технологии микродугового оксидирования поршней применяли сплав на основе алюминия (АК12) и электролит на основе натриевого жидкого стекла, гидроксида и фосфата натрия. Определение микротвердости теплозащитных слоев проводили по стандартной методике на поперечных микрошлифах по ГОСТ 9450–76. Пористость теплозащитных слоев оценивали по ГОСТ 9.302–88. Измерение коэффициента температуропроводности и теплопроводности определяли методом лазерной вспышки LFA 427. Стендовые испытания бензинового двигателя УМЗ-417 со штатными поршнями (без теплозащитных оксидных слоев) и поршнями с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней проводились по ГОСТ 14846–81 на стенде КИ-5543 ГОСНИТИ.

Результаты. Установлено влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания. Показано, что снижение теплопроводности днища поршня позволяет улучшить технические характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Выводы. По результатам стендовых испытаний установлено, что у двигателей с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней повышаются максимальный крутящий момент и эффективная мощность, снижается часовая и удельный эффективный расход топлива, уменьшается содержание в отработанных газах оксида углерода и углеводорода.

Ключевые слова: поршень, оксид, электролит, теплопроводность.

I. A. Kazantsev, V. I. Bychkov, A. I. Kazantsev

IMPACT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF PISTON ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Abstract.

Background. The object of the study are pistons of internal combustion engines. The subject of the research is the process of obtaining protective coatings on pistons by microarray oxidation. The aim of the work is to establish the influence of thermal properties of pistons on the performance of internal combustion engines.

Materials and methods. Aluminum-based alloy (AC12) and electrolyte based on sodium liquid glass, sodium hydroxide and sodium phosphate were used in the research and development of the technology of micro-arc oxidation of pistons. Determination of microhardness of heat-shielding layers was carried out according to the standard technique on cross-section microshoots according to GOST 9450-76. The porosity of the heat-shielding layers was evaluated according to GOST 9.302-88. Temperature conductivity and thermal conductivity were measured by laser flash method LFA 427. Bench tests of the petrol engine UMZ-417 with standard pistons (without thermal protection oxide layers) and pistons with thermal protection oxide layers on the bottoms of pistons were carried out according to GOST 14846-81 on the stand KI-5543 GOSNITI.

Results. The influence of thermal properties of pistons on the performance of internal combustion engines is established. It is shown that reducing the thermal conductivity of the piston bottom allows to improve the technical characteristics of internal combustion engines.

Summary. By results of bench tests it is established that at engines with heat-proof oxide layers on bottoms of pistons the maximum torque and effective power increase, the hour and specific effective fuel consumption decreases, the content in the fulfilled gases of carbon monoxide and hydrocarbons decreases.

Key words: piston, oxide, electrolyte, thermal conductivity.

Введение

Одним из основных направлений повышения технических характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является снижение тепловых нагрузок на гильзо-поршневые группы. Особенно это принципиально для днища поршня. Высокие температуры приводят к возникновению таких дефектов, как оплавление и прогар поршня, которые происходят при значительном градиенте давлений в камере сгорания. Совместное влияние циклических и термических напряжений, инерционных сил, как правило, приводит к разрушению днища поршня и, как следствие, к остановке двигателя. При этом температура на поверхности днища поршня достигает 350–400 °С [1]. В форсированных ДВС температура может достигать 400–450 °С, что приводит к снижению прочностных характеристик алюминиевых поршней за счет частичного подплавления и окисления границ зерен. Поэтому температура на поверхности днища поршня из алюминиевого сплава не должна превышать 450 °С [2].

Перспективным направлением решения этой проблемы является нанесение на днище поршня теплоизоляционных слоев. Разработка новых технологий и формирование теплоизоляционных слоев на днище поршня с целью улучшения технических характеристик современных ДВС представляют собой актуальную научно-техническую задачу.

Известны способы получения покрытий с теплозащитными свойствами (установка на днище поршня многослойных пластин [3]; применение вставок; напыление керамических покрытий из оксидов алюминия и циркония [4, 5]) требуемых адгезионных свойств, что приводит к их разрушению и отслоению в результате воздействия температурных и механических нагрузок. В этой связи большой интерес представляет технология микродугового оксидирования (МДО) днищ поршней ДВС, обеспечивающая их тепловую защиту.

МДО – один из новых видов получения материалов с широким комплексом свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость, тепло-

стойкость, электроизоляционные характеристики, декоративность, и уникальным их сочетанием [6].

Предварительные исследования, например покрытий на поршнях для двигателей внутреннего сгорания с нестабильной микроструктурой, повысили их термостойкость в 2...2,5 раза (до 1600...1950 термоциклов) [7].

1. Материалы и методики

При МДО поршней ДВС из сплава АК12 были выбраны наиболее рациональные режимы (плотность тока $j - 5 \text{ А/дм}^2$; напряжение $U - 120 \text{ В}$; время – 5 мин) и состав электролита (силиката натрия ($n\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$) – 80 г/л; фосфата натрия (Na_3PO_4) – 5 г/л и гидроксида натрия (NaOH) – 5 г/л).

Определение микротвердости теплозащитных слоев проводили по стандартной методике на поперечных микрошлифах по ГОСТ 9450–76 [8].

Образцы для исследований шлифовали для удаления рыхлого слоя покрытия с последующей полировкой. Для измерений применяли наконечник, в виде четырехгранной пирамиды с углом при вершине $136^\circ 20'$, нагрузка – 1,96 Н. Погрешность измерений – не более 0,3 мкм.

Пористость теплозащитных слоев оценивали по ГОСТ 9.302–88 [9].

Измерение коэффициента температуропроводности и теплопроводности определяли методом лазерной вспышки LFA 427.

При подготовке к измерению поверхности образца очищаются спиртом и покрываются коллоидным графитом (согласно инструкции по эксплуатации прибора и для лучшего поглощения теплового импульса), после чего помещаются в держатель прибора. Измерение проводится в атмосфере инертного газа – аргона.

Коэффициент температуропроводности α определяли по формуле

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{l^2}{t_{0,5}}, \quad (1)$$

где l – толщина пробы; $t_{0,5}$ – время достижения 50 % значения от максимальной температуры.

Измерение удельной теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC823е. Согласно методике измерения на данном приборе масса образца должна быть сравнима с массой эталона, в качестве которого используется сапфировый диск.

Подготовка измерения начинается с изготовления навески из массивного образца. Форма и размеры навески определяются двумя факторами:

- объем тигля, в котором находится навеска при измерении, составляет 40 микролитров;
- навеска должна иметь максимально возможную площадь контакта с дном тигля.

Расчет значений удельной теплоемкости C_p из экспериментального сигнала основан на следующем соотношении:

$$C_p = \frac{DSC_{S+pan} - DSC_{zeroline}}{DSC_{St+pan} - DSC_{zeroline}} \frac{m_{St}}{m_S} C_{p,St}, \quad (2)$$

где DSC_{S+pan} , DSC_{St+pan} – экспериментальный сигнал от образца (S) и тигля (pan), в который образец помещен, и стандарта (St) и тигля соответственно; $DSC_{zeroline}$ – экспериментальный сигнал от пустого тигля (нулевая линия или бланковый сигнал); m_S , m_{St} – масса образца (навески) и эталона; $C_{p,S}$, $C_{p,St}$ – удельная теплоемкость образца (навески) и эталона.

Расчет теплопроводности осуществлялся согласно выражению

$$\lambda(T) = \alpha(T) \cdot \rho(T) \cdot c_p(T), \quad (3)$$

где $\alpha(T)$, $\rho(T)$ и $c_p(T)$ – температуропроводность, плотность и удельная теплоемкость образца при данной температуре.

Объекты испытаний представляли собой образцы материалов на основе алюминиевого сплава АК12 с оксидным покрытием и без него. Размер образцов 10×10 мм, толщина 5 мм. Плотность образцов составляла 2720 кг/м^3 .

Структуру теплозащитных оксидных слоев исследовали методом растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа [10].

Стендовые испытания бензинового двигателя УМЗ-417 со штатными поршнями (без теплозащитных оксидных слоев) и поршнями с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней проводились по ГОСТ 14846–81 [11] на стенде КИ-5543 ГОСНИТИ [12, 13]. Расчет эксплуатационных характеристик ДВС, оснащенного штатными поршнями и поршнями с теплозащитными оксидными слоями, проводили по методике [12].

Крутящий момент двигателя M_K определялся по формуле

$$M_K = P_{\text{ПИУ}} l, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ПИУ}}$ – показания измерительного устройства тормоза стенда, Н; l – плечо весового устройства тормоза стенда, 0,7162 м.

Эффективную мощность N_e двигателя определяли по формуле

$$N_e = \frac{M_K \cdot n \cdot 1,36}{716,2}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} .

Расход топлива (G_T кг/ч) исследуемого двигателя определяли весовым способом с последующим расчетом по формуле

$$G_T = \frac{3,6 \Delta G}{\tau}, \quad (6)$$

где ΔG – количество топлива, израсходованное за время проведения измерения, г; τ – время проведения измерения расхода топлива, с.

Удельный расход топлива (g_e , г/кВт·ч) исследуемых двигателей определяли по формуле

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3, \quad (7)$$

где N_e – мощность двигателя, установленная при исследованиях, кВт.

2. Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа макро- и микрошлифа установлено, что толщина теплозащитных оксидных слоев составила 25 мкм (рис. 1) – 4...5 мкм поверхностного слоя и 20...25 мкм рабочего [6, 7].

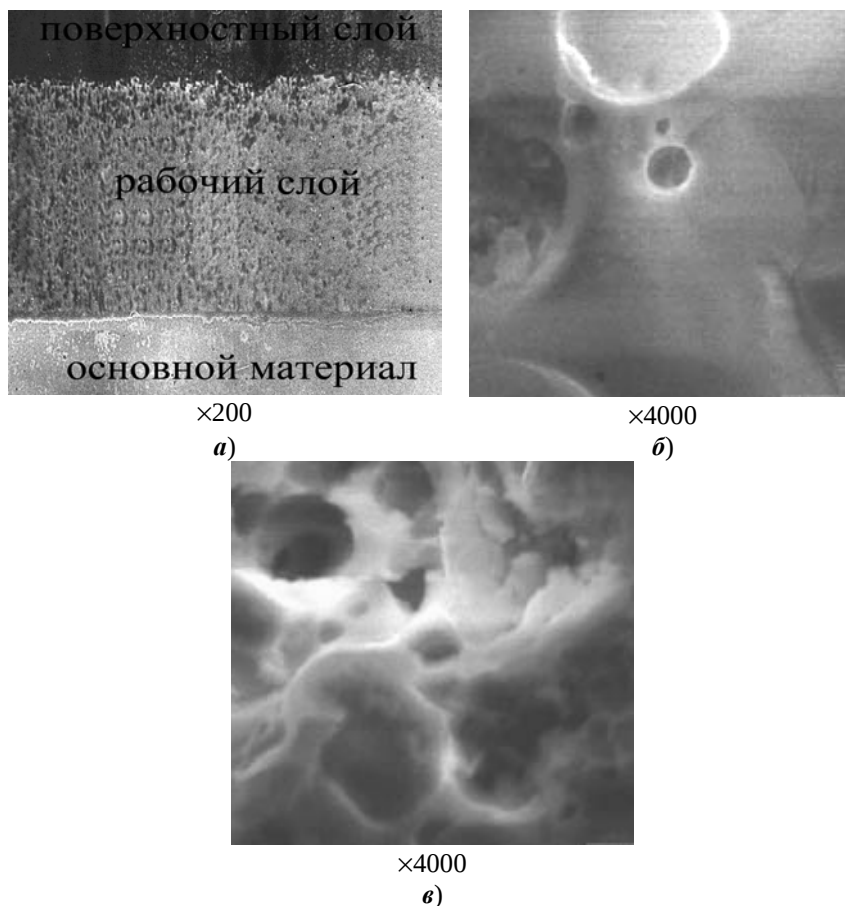


Рис. 1. Структура и пористость теплозащитных оксидных слоев днища поршня:

а – макроструктура; *б* – пористость рабочего слоя;
в – пористость поверхностного слоя

Микротвердость штатного поршня составила 540 МПа, а оксидированного – 1200 МПа, что в 2,2 раза выше, чем у штатного.

Теплофизические характеристики материала штатного поршня и поршня с теплозащитными оксидными слоями представлены в табл. 1.

Результаты исследования теплопроводности материалов днища поршня, обработанных МДО (покрытие с одной стороны), при различных температурах испытания показали существенное влияние на коэффициент теплопроводности λ наличие оксидных слоев. Установлено, что после МДО днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25–26 % и составил в среднем $\lambda \sim 97,30$ Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 122$ –126 Вт/(м·К)).

Характеристики теплопроводности

Объект испытаний	Температура испытаний, °С	Наименование параметра		
		Теплоемкость, Дж/кг·К	Температуропроводность, мм ² /с	Теплопроводность, Вт/м·К
AK12 без теплозащитных оксидных слоев	130	0,87	52,33	123,73
	150	0,86	52,20	122,46
	170	0,88	51,93	124,26
	190	0,88	51,72	123,82
	210	0,89	51,60	124,92
	230	0,91	51,19	126,40
AK12 с теплозащитными оксидными слоями	130	0,87	42,33	100,54
	150	0,86	42,15	98,96
	170	0,86	41,89	98,06
	190	0,84	41,67	95,56
	210	0,84	41,45	95,05
	230	0,87	41,12	97,30

В результате исследования теплозащитных оксидных слоев установлено, что структура и пористость неоднородны по толщине. Пористость по толщине также неоднородна (рис. 2), сквозные каналы пор отсутствуют, что позволяет обеспечивать высокие теплоизоляционные свойства днища поршня.

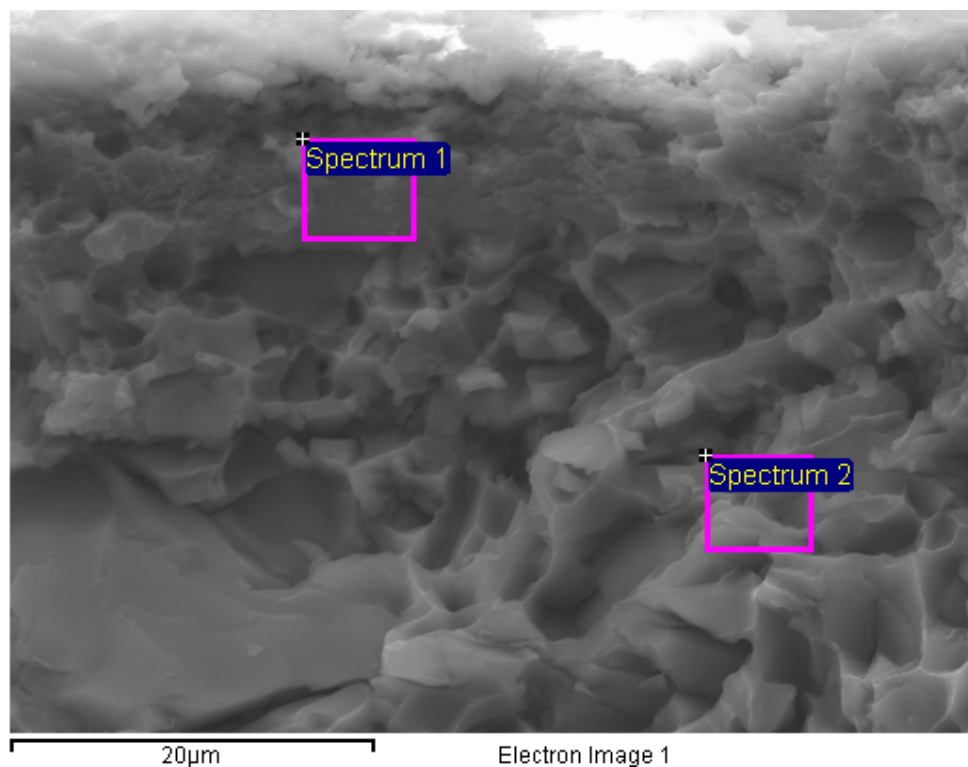


Рис. 2. Поверхность излома образца с теплозащитными оксидными слоями на днище поршня

Выделенные области на микрофотографиях подтверждают неоднородность оксидных слоев. Поры и отслоения на границе «покрытие – материал поршня» отсутствуют.

Анализ микрофотографий (рис. 3, 4) позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой (рис. 3) имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой (рис. 4).

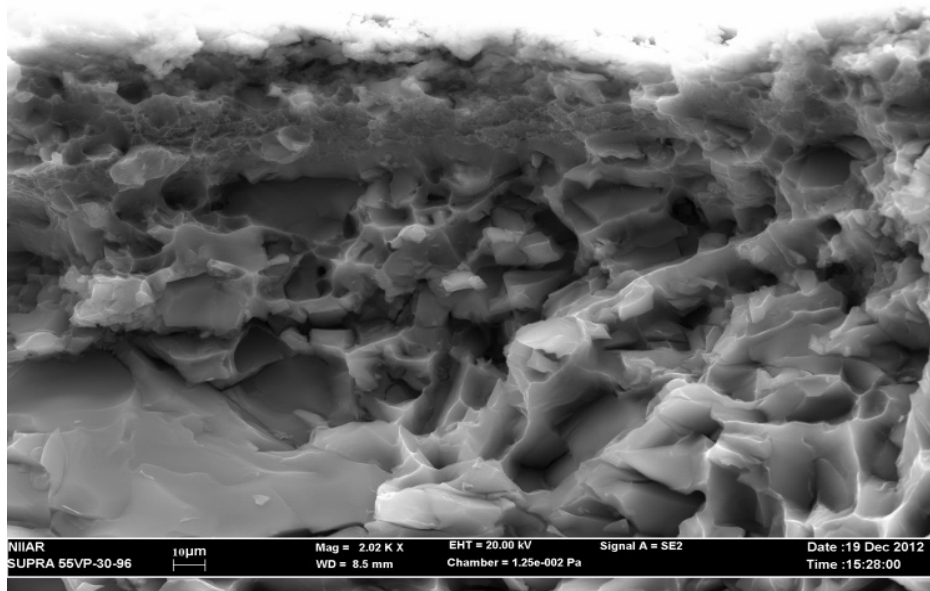


Рис. 3. Поверхность излома поверхностного оксидного слоя

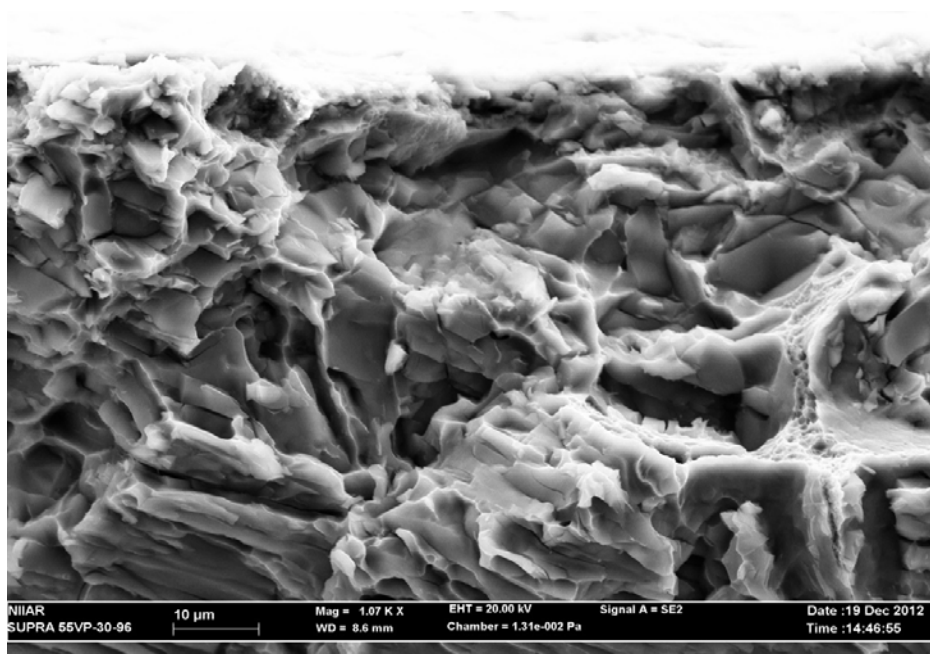


Рис. 4. Поверхности излома рабочего оксидного слоя

Результаты стендовых испытаний представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Внешняя скоростная характеристики двигателя

Объект испытаний	Наименование параметра			
	Эффективная мощность (N_e), кВт	Максимальный крутящий момент (M_k), Н·м	Удельный эффективный расход топлива (g_e), г/кВт·ч	Часовой расход топлива (G_T), кг/ч
Двигатели, оснащенные поршнями без теплозащитных оксидных слоев	59,6	175–180	280,3–281,3	19,9
Двигатели, оснащенные поршнями с теплозащитными оксидными слоями	62,6	165–170	258,7 – 259,9	19,1

Таблица 3

Нагрузочная характеристики двигателя

Объект испытаний	Наименование параметра			
	Удельный эффективный расход топлива (g_e), г/кВт·ч	Часовой расход топлива (G_T), кг/ч	Содержание оксида углерода (CO), %	Содержание углеводорода (CH), %
Двигатели, оснащенные поршнями без теплозащитных оксидных слоев	736,90	3,83	0,75	30
Двигатели, оснащенные поршнями с теплозащитными оксидными слоями	619,77	3,79	0,70	27

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов скоростных характеристик показывает (табл. 2), что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, эффективная мощность растет с увеличением скорости. Так, при частоте вращения коленчатого вала 4100 мин^{-1} эффективная мощность у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 3 кВт больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет $N_e = 62,6 \text{ кВт}$.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала $2400\text{--}2500 \text{ мин}^{-1}$ максимальный крутящий момент у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 10 Н·м больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет 175–180 Н·м.

При оборотах 2400–2500 мин⁻¹ удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней снизился в среднем на 7,7 % и составил 258,7–259,9 г/кВт·ч.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала 4100 мин⁻¹ часовой расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней снизился на 4,6 % и составил 19 кг/ч.

При частоте вращения 2400–2500 мин⁻¹ фиксировали нагрузочные характеристики двигателя (табл. 3). Указанная частота вращения коленчатого вала является номинальной и соответствует максимальному крутящему моменту двигателя.

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов нагрузочных характеристик показывает, что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, часовой расход топлива на 1,1 % меньше и составил 3,79 кг/ч (при минимальной мощности 6,17 кВт). При этом удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 16 % меньше, чем у двигателей со штатными поршнями, и составляет 619,77 г/кВт·ч.

У двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней снизилось содержание оксида углерода (CO) и углеводорода (CH) в отработанных газах в среднем на 7 и 10 % соответственно по сравнению с двигателем со штатными поршнями.

Результаты стендовых испытаний согласуются с данными работы [14].

Результаты исследований позволяют сделать вывод об эффективной защите поршней ДВС, оснащенных теплозащитными оксидными слоями, от воздействия высокотемпературных тепловых потоков, выходящих из камер внутреннего сгорания, что позволяет увеличить эффективную мощность и максимальный крутящий момент, снизить удельный и часовой расход топлива. Повышение температуры сгорания топлива, в свою очередь, снижает токсичность отработанных газов.

Заключение

Установлено, что после МДО днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25–26 % и составил в среднем $\lambda \sim 97,30$ Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 122–126$ Вт/(м·К).

Анализ микрофотографий позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой.

По результатам стендовых испытаний установлено, что у двигателей с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней повышаются максимальный крутящий момент и эффективная мощность, снижается часовой и удельный эффективный расход топлива (часовой на 4,6 %, удельный на 7,7 %), уменьшается содержание в отработанных газах оксида углерода на 7 %, углеводорода на 10 %.

Выводы

Установлено влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания. Показано, что

снижение теплопроводности днища поршня позволяет улучшить технические характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. Бугаев, В. П. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей / В. П. Бугаев. – М. : Колос, 1981. – 209 с.
3. Пат. 585034 СССР. Способ тепловой защиты днища поршня / Сергеев А. В., Казаков Н. Ф., Смирнова Т. Н., Болдырев И. В. – 1977, Бюл. № 47. – 2 с.
4. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, А. А. Зеленцов, С. М. Кадыров, М. М. Арипджанов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 83–102.
5. Сибриков, Д. А. Снижение теплонапряженности поршневых групп судовых дизелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сибриков Д. А. – Новосибирск, 2004. 18 с.
6. Казанцев, И. А. Технология получения композиционных материалов микродуговым окислением : монография / И. А. Казанцев, А. О. Кривенков. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2007. – 239с.
7. Казанцев, И. А. Теплофизические характеристики поршней ДВС с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности / И. А. Казанцев, В. С. Скачков, А. М. Данилин // Проблемы машиностроения и технологии материалов на рубеже веков : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2003. – Ч. 1. – С. 264–266.
8. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (СТ СЭВ 1195–78). – М., 1976.
9. ГОСТ 9.302–88. Покрытия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля). – М., 1988.
10. Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ : пер. с англ. : в 2 кн. Кн. 2 / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. – М. : Мир, 1984. – 384с.
11. ГОСТ 14846–81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М., 1981.
12. Шкилько, А. М. Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования / А. М. Шкилько. – К. : ИСИО, 1994. – 170 с.
13. Шкилько, А. М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов : монография / А. М. Шкилько. – Харьков : Ноулидж, 2009. – 240 с.
14. Пат. 2439211 Российской Федерации, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия, титана, и их сплавов / Казанцев И. А., Кривенков А. О., Чугунов С. Н., Хохлов А. Л., Степанов В. А., Сафаров К. У. – № 2010140537/02 ; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

References

1. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley: uchebnyk dlya vtuzov po spetsial'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya»* [Engines of internal combustion: Theory of piston and combined engines: a textbook for

- technical universities in the specialty "Internal combustion engines"]. Eds. A. S. Orlin, M. G. Kruglov. 4th ed., rev. and updated. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 372 p.
2. Bugaev V. P. *Ekspluatatsiya i remont forsirovannykh traktornykh dvigateley* [Operation and repair of forced tractor engines]. Moscow: Kolos, 1981, 209 p.
 3. *Pat. 585034 SSSR. Sposob teplovoy zashchity dnishcha porshnya* [Patent 585034 USSR. The method of thermal protection of the piston bottom]. Sergeev A. V., Kazakov N. F., Smirnova T. N., Boldyrev I. V. 1977, Bul. № 47, 2 p.
 4. Kavtaradze R. Z., Onishchenko D. O., Zelentsov A. A., Kadyrov S. M., Aripdzhanov M. M. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Machine building]. 2011, no. 4, pp. 83–102.
 5. Sibrikov D. A. *Snizhenie teponapryazhennosti porshnevykh grupp sudovykh dizeley: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Reducing the thermal stress of the piston groups of ship diesel engines: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Novosibirsk, 2004, 18 p.
 6. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O. *Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh materialov mikrodugovym oksidirovaniem: monografiya* [Technology for producing composite materials by microarc oxidation: monograph]. Penza: Inf. izd. tsentr PenzGU, 2007, 239 p.
 7. Kazantsev I. A., Skachkov V. S., Danilin A. M. *Problemy mashinostroeniya i tekhnologii materialov na rubezhe vekov: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Problems of machine building and materials technology at the turn of the century: proceedings of VIII International scientific and practical conference]. Penza, 2003, part 1, pp. 264–266.
 8. *GOST 9450–76. Izmerenie mikrotverdosti vдавlivaniemalmaznykh nakonechnikov (ST SEV 1195–78)* [State standart 9450-76. Measurement of microhardness by indentation of diamond tips (ST CAME 1195-78)]. Moscow, 1976.
 9. *GOST 9.302–88. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie (metody kontrolya)* [State standart 9.302-88. Metallic and non-metallic inorganic coatings (control methods)]. Moscow, 1988.
 10. Gouldsteyn Dzh., N'yuberi D., Echlin P. i dr. *Rastrovaya i elektronnyaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz: per. s ang.: v 2-kh knigakh. Kn. 2.* [Raster and electron microscopy and X-ray microanalysis: translated from English: in 2 books. Book 2]. Moscow: Mir, 1984, 384 p.
 11. *GOST 14846–81 Dvigateli avtomobil'nye. Metody stendovykh ispytaniy* [Automotive engines. Methods of benchmark test]. Moscow, 1981.
 12. Shkil'ko A. M. *Nerazrushayushchie metody kontrolya metallov i uzlov energeticheskogo oborudovaniya* [Non-destructive testing methods for metals and energy equipment components]. Kiev: ISIO, 1994, 170 p.
 13. Shkil'ko A. M. *Ekzozemissionnaya diagnostika poverkhnosti konstruksionnykh materialov: monografiya* [Examination diagnostics of the surface of structural materials: monograph]. Kharkov: Noulidzh, 2009, 240 p.
 14. *Pat. 2439211 Rossiyskoy Federatsii, MPK F02F 3/12. Sposob obrabotki porshney dvigateley vnutrennego sgoraniya iz alyuminiya, titana, i ikh splavov* [Patent 2439211 of the Russian Federation, MPK F02F 3/12. The method of processing the pistons of internal combustion engines of aluminum, titanium, and their alloys]. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O., Chugunov S. N., Khokhlov A. L., Stepanov V. A., Safarov K. U. № 2010140537/02; appl. 04.10.2010; publ. 10.01.2012, Bul. № 1.

Казанцев Игорь Алексеевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kazancev678@mail.ru

Kazantsev Igor' Alekseevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of welding,
foundry and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Бычков Валерий Игоревич

магистрант, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pnz.el@mail.ru

Bychkov Valeriy Igorevich

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Казанцев Алексей Игоревич

инженер-механик I категории, Научно-
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, Байдукова, 2)

E-mail: ale.kaza@yandex.ru

Kazantsev Aleksey Igorevich

Engineer-mechanic of 1st category,
Scientific production enterprise "Rubin"
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

УДК 539.232

Казанцев, И. А.

Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания / И. А. Казанцев, В. И. Бычков, А. И. Казанцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 107–118. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-10.

С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР
РАЗРАБОТКИ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ,
РЕАЛИЗУЕМЫХ НА ОБОРУДОВАНИИ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ****Аннотация.**

Актуальность и цели. Объектом исследования является проектирование технологических операций механообработки. Предмет исследования – процесс разработки структуры операций, реализуемых на оборудовании токарной группы. Цель – разработка моделей и методик для формализации проектных процедур генерации возможных вариантов, отсева нерациональных и выбора рациональных вариантов структур технологических операций.

Материалы и методы. Для разработки моделей и методик использовался математический аппарат теории сетей Петри и теории графов.

Результаты. Разработаны три математические модели, описывающие процессы разработки структур технологических операций, выполняемых на оборудовании токарной группы, и методики отсева нерациональных и выбора рациональных вариантов структур операции.

Выводы. Разработанные модели и методики дают возможность создания алгоритмов и программ для ЭВМ, полностью автоматизирующих разработку структур технологических операций для оборудования токарной группы, обеспечивая сокращение времени и повышение качества проектирования.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, автоматизация проектирования, разработка структур технологических операций, система автоматизированного проектирования технологических процессов, САПР ТП.

S. G. Mitin, P. Yu. Bochkarev

**MODELS AND METHODS OF AUTOMATION
OF PROCEDURES FOR DEVELOPMENT OF STRUCTURES
OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS IMPLEMENTED
ON THE EQUIPMENT OF THE LARGE GROUP****Abstract.**

Background. The object of research is the design of machining operations. Subject of research is the developing of the operation structure implemented on the turning equipment group. The purpose is to develop the models and methods for the formalization of the design procedures related to the generation of the possible options, the elimination of the non-rational and the choosing of the rational options of the machining operation structures.

Materials and methods. The mathematical formalism of Petri nets and graph theory was used to develop the models and techniques.

Results. Three mathematical models was created that describe the processes of development of the machining operation structures for the turning equipment group.

The techniques was developed for the elimination of the non-rational and the selection of the rational options of the machining operation structures.

Conclusions. The developed models and techniques can be used to create the algorithms and computer programs that fully automate the development of machining operation structures for turning equipment groups. It leads to the reduction in the time and improve the quality of the design.

Key words: technological preparation, design automation, design of machining operation structure, computer-aided process planning system, CAPP.

Введение

В настоящее время существует серьезная научная проблема, заключающаяся в необходимости полной автоматизации проектирования технологий для машиностроительных производств. Это обусловлено тем, что в современном машиностроении наблюдается тенденция к расширению номенклатуры изготавливаемых изделий, для которых постоянно необходима разработка новых или изменение существующих технологий изготовления. Определяющими задачами становятся сокращение длительности производственного цикла и снижение себестоимости продукции.

Наиболее трудоемкими и затратными являются мероприятия технологической подготовки производства, которые занимают до 70 % производственного цикла. Как показали исследования возможностей существующих программных продуктов, задача полной автоматизации проектирования технологических процессов (ТП) к настоящему времени не решена.

Первая система автоматизированного проектирования ТП (САПР ТП) «САМ-I» была разработана в 1976 г. [1]. С 80-х гг. XX в. благодаря развитию информационных технологий растет интерес к применению ЭВМ для автоматизации проектирования ТП. В работе [2] проведен обзор публикаций по теме САПР ТП, выделены два основных подхода к разработке САПР ТП: вариативный и генеративный, и описаны математические методы, используемые при создании САПР ТП.

При вариативном подходе используются типовые, групповые ТП или ТП-аналоги, которые служат основой для разработки единичного ТП для каждой обрабатываемой детали. В этом случае САПР ТП предоставляет удобный интерфейс и является автоматизированным справочником для редактирования базового ТП, поиска оборудования, обрабатывающего инструмента и другой технологической оснастки. Ключевые решения по разработке маршрута механообработки, структур технологических операций, выбору оборудования и оснастки принимаются технологом, что в условиях недостатка времени приводит к снижению качества проектирования и не позволяет существенно снизить затраты времени на проектирование.

При генеративном подходе ТП для обработки каждой детали создается «с нуля» без участия человека. Подобные САПР ТП разработаны таким образом, чтобы синтезировать ТП автоматически на основе заложенных логических правил и использования технологических баз данных. Генеративный подход позволяет избежать недостатков, присущих вариативному подходу, но его «узким местом» остается сложность в представлении, обработке и использовании человеческих знаний и опыта в виде, пригодном для ЭВМ.

Согласно [2] устоявшимися подходами и методами для описания проектных процедур в САПР ТП являются: технологии на основе конструктив-

ных элементов, системы на основе баз знаний, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, теория нечетких множеств и нечеткой логики, сети Петри, агентные технологии, Интернет-технологии, метод на основе стандарта по обмену производственными данными (STEP) и формирование функциональных блоков для решения отдельных задач по выбору технологических операций, их структур, обрабатывающего инструмента, планирования наладок, траекторий движения инструмента и др.

Вопросами автоматизации проектирования технологических операций для одношпиндельных токарных автоматов занимались авторы работы [3], в которой представлена интеллектуальная САПР ТП, содержащая подсистему логического вывода, которая используется при синтезе структуры ТП. Недостатком этой системы является ее узкая направленность на определенную подгруппу оборудования и класс обрабатываемых деталей, которые ограничены телами вращения.

Таким образом, наиболее перспективным направлением разработки современных САПР ТП видится использование генеративного подхода, которому присущи более строгие научные положения, систематизированность и возможность автоматизации на более высоком уровне по сравнению с вариативным подходом. Только создание научных принципов, новых методик, моделей и алгоритмов для автоматизации всех проектных процедур позволит существенно сократить сроки и повысить качество технологической подготовки машиностроительных производств. Такой подход взят за основу создания системы автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (САПМ ТП) [4, 5].

Моделирование проектных процедур разработки структур технологических операций в рамках САПМ ТП имеет существенные отличия для различных групп технологического оборудования, для которого проектируется технологическая операция. В работах [6–8] показаны подходы к формализации проектных процедур по формированию структур технологических операций для оборудования сверлильной и фрезерной групп, для которых характерна простая последовательность реализации технологических переходов.

В работе [9] описана модель процедуры разработки структуры технологических операций, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного точения с учетом возможности параллельной реализации технологических переходов, но не показано, возможно ли ее применение для всей токарной группы оборудования и каким образом производится выбор окончательного варианта структуры из сгенерированного множества.

Настоящая работа посвящена разработке моделей и методик, формализующих проектные процедуры, связанные с формированием рациональных структур технологических операций для оборудования токарной группы. Структура работы обусловлена методологией синтеза, согласно которой проектное решение формируется в три этапа. На первом этапе производится генерация всех возможных вариантов решений. На втором этапе с целью сокращения размерности решаемой оптимизационной задачи определяется критерий отсева, по которому из сгенерированного множества вариантов отсеиваются нерациональные. На третьем этапе из оставшегося множества вариантов выбирается рациональный для складывающихся производственных условий.

1. Разработка модели процедуры генерации вариантов структур технологических операций для оборудования токарной группы

Оборудование токарной группы обладает широкими технологическими возможностями благодаря наличию у различных представителей как одного так и нескольких инструментальных суппортов, каждый из которых может иметь несколько инструментальных позиций, или сверлильно-резьбонарезного устройства, в котором возможно размещение одного или нескольких режущих инструментов (РИ), а также возможно наличие дополнительного независимого шпинделя, обеспечивающего обработку с помощью осевых РИ. Для согласованной и эффективной работы этих устройств необходима разработка рациональной структуры технологической операции. Наибольшая эффективность достигается за счет максимального использования параллельной обработки различных поверхностей детали.

Формализовать процесс принятия такого рода решений – достаточно сложная научная задача, которая требует использования соответствующего математического аппарата. Технологическая операция является дискретной системой, поскольку состоит из взаимосвязанных компонент – технологических переходов, поэтому, проанализировав современные методы описания такого рода систем с учетом необходимости обеспечения совместной и параллельной реализации компонент, мы пришли к выводу, что наиболее подходящим видится математический аппарат сетей Петри, позволяющий моделировать параллельные и асинхронно взаимодействующие процессы, а также удобный для последующей алгоритмизации и программирования. Кроме того, сети Петри успешно применялись для моделирования процедур формирования маршрутов обработки [4], оперативного планирования [10] и других задач, связанных с описанием динамических дискретных систем [11, 12].

Ввиду того что процедура генерации возможных вариантов структур технологических операций для оборудования токарной группы является комплексной задачей, целесообразно дифференцировать ее на две подзадачи: формирование рациональных вариантов размещения РИ в инструментальных суппортах и отдельных позициях для инструмента; поиск рациональных последовательностей по реализации технологических переходов.

Исходное описание отдельной компоненты системы представляется в виде элемента множества кортежей технологических переходов $C = \{C_i\}$, где $i = 1 \dots n$, n – количество кортежей. В САПМ ТП под кортежем понимается группа взаимосвязанных элементов данных, относящихся к отдельному технологическому переходу (тип обрабатываемой поверхности, ее размеры, требуемая точность, материал и т.д.), поступивших с предыдущих этапов проектирования ТП [4]. При этом для каждого кортежа C_i уже сформированы возможные варианты РИ. В качестве описания компонентов системы введено обозначение $C_i(R_j)$, смысл которого состоит в том, что R_j – вариант РИ (где $j = 1 \dots m$, m – количество РИ, сгенерированных на предыдущих этапах проектирования) используется на технологическом переходе C_i .

На рис. 1 представлена разработанная математическая модель для описания проектной процедуры, направленной на поиск рациональных вариантов размещения РИ в инструментальных суппортах и отдельных позициях для инструмента. Данная модель отличается от классических сетей Петри, поскольку маркировка узлов отражает текущее состояние отдельных компо-

нентов системы, а для сетевых переходов на отдельных уровнях разработаны различные логические правила открытия/закрытия.

Первый уровень сети направлен на решение задачи поиска возможных вариантов размещения РИ в инструментальных суппортах. На данном уровне маркировка узлов из множества $P_1 = \{P_1^1, P_1^2, \dots\}$ соответствует описанию одной из компонент системы (здесь и далее с помощью нижнего индекса обозначаем шаг решения задачи, с помощью верхнего индекса – элемент множества на данном шаге). Множество сетевых переходов обозначим как $T_1 = \{T_1^1, T_1^2, \dots\}$. Множество мест P'_1 имеет маркировку в соответствии с имеющимся множеством суппортов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_u\}$, где u – количество суппортов. Состояние сетевого перехода из T_1 обусловлено наличием или отсутствием возможности установки РИ в одном из суппортов и вызывает изменение маркировки в множестве мест $P_2 = \{P_2^1, P_2^2, \dots\}$. Здесь и далее поскольку для различных вариантов сочетаний может существовать множество подходящих вариантов, будем использовать термин «комплекты» для обозначения множества выходных позиций сетевых переходов (на рисунках обозначены несколькими стрелками от каждого сетевого перехода).

На втором уровне сети процедура открытия сетевых переходов из множества $T_2 = \{T_2^1, T_2^2, T_2^3, \dots\}$ обусловлена возможностью установки варианта РИ из множества P_2 в соответствующих инструментальных позициях, заданных множеством $S = \{S_1, S_2, \dots, S_v\}$, где v – количество инструментальных позиций в суппорте.

По результатам моделирования на первых двух шагах формируется множество решений по распределению и привязке РИ к конкретным инструментальным позициям, доступным на соответствующем оборудовании.

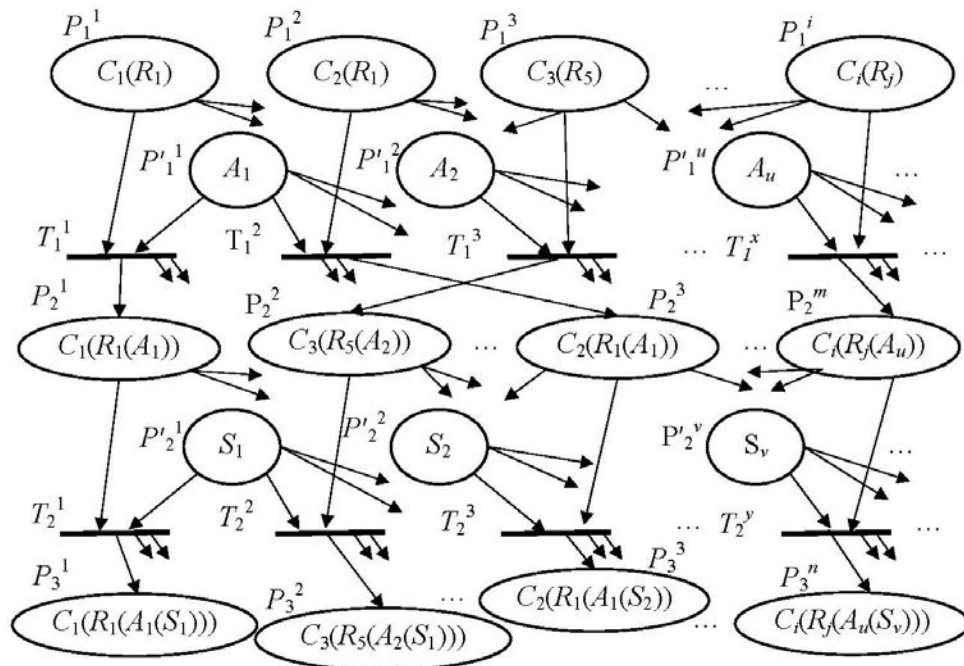


Рис. 1. Модель процедуры рационального размещения РИ по позициям оборудования

Следующий уровень сети Петри отражает процедуру объединения элементов из различных комплектов выходных мест, полученных на предыдущих уровнях, в множества возможных последовательностей, образующих варианты структур технологических операций. С этой целью на основе множества мест P_3 , разработанной структуры сети (рис. 2) и сформированной логики открытия сетевых переходов $T_3, \dots, T_{n+2}$ генерируются варианты инструментальных наладок, в которых не используются одинаковые инструментальные позиции.

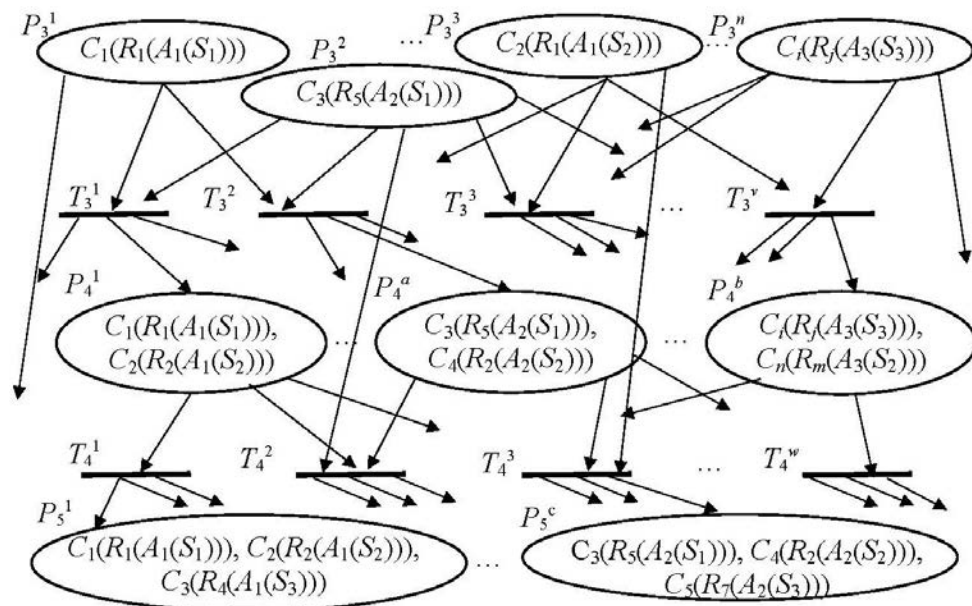


Рис. 2. Модель объединения комплектов сети Петри в варианты операции

Количество шагов зависит от исходной маркировки, т.е. от количества технологических переходов в операции. На каждом следующем шаге происходит последовательное добавление технологического перехода в проектируемую операцию. На шаге T_3 происходит объединение возможных пар технологических переходов, на шаге T_4 – троек технологических переходов и т.д. Таким образом, после завершающего шага формируются возможные варианты, которые содержат маркировку, включающую в себя все компоненты системы «технологический переход – РИ – инструментальный суппорт – инструментальная позиция».

Следующий этап направлен на решение задачи определения последовательности реализации технологических переходов. Многовариантность данной задачи обусловлена наличием различных способов реализации последовательностей технологических переходов для каждой инструментальной наладки в пространственном и временном аспектах. В первую очередь необходимо сформировать последовательности реализации технологических переходов на основе следующих положений:

– комплекты РИ, полученные в результате объединения технологических переходов на шагах $T_3, \dots, T_{n+2}$, направленные на обработку одной и той

же элементарной поверхности, должны соответствовать порядку выполнения технологических переходов;

– необходимость учета пространственных ограничений, заданных при конструировании детали (например, «внутренняя цилиндрическая поверхность – внутренняя резьба», «наружная цилиндрическая поверхность – шпоночный паз» и др.);

– анализ специфических технологических переходов, например центровка, отрезка, которые располагаются в начале или в конце обработки;

– исследование технологических возможностей оборудования на предмет параллельной реализации обработки различных поверхностей.

Для описания процесса поиска вариантов, удовлетворяющих указанным положениям, разработана модель на основе сетей Петри (рис. 3). Результаты работы сетевой модели из рис. 2 являются исходными данными для формирования моделей на рис. 3. Каждая полученная последовательность термов формирует соответствующую сеть, в которой определяется возможность или отсутствие возможности параллельной реализации технологических переходов.

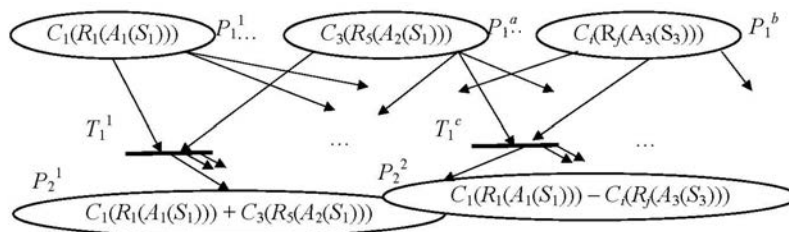


Рис. 3. Модель установления порядка выполнения технологических переходов

Исследование сети Петри позволяет сформировать все возможные последовательности технологических переходов с учетом указанных выше ограничений как для пар комплектов РИ, так и для ранее сформированных групп РИ путем рассмотрения каждого сочетания комплектов РИ из двух групп. Указанная логика заложена в процедурах открытия сетевых переходов, а полученные решения отражаются в изменении маркировки сети.

Итогом проектирования структуры технологической операции является конечное множество мест сети Петри, которые получают маркировку, отражающую возможные варианты последовательностей выполнения технологических переходов в операции (условное обозначение « $\rightarrow$ » указывает на необходимость последовательной реализации технологических переходов, « $+$ » – необходимость параллельной реализации технологических переходов).

Для поиска возможности параллельной реализации технологических переходов в множестве T_1 сформулированы следующие условия:

– возможность параллельной обработки имеется только для смежных по последовательности технологических переходов;

– необходимость размещения задействованных РИ в различных суппортах;

– комплекты, имеющие отношение к обработке одной и той же поверхности, недопустимы;

– необходимость учета пространственных ограничений обрабатываемых поверхностей;

– близость и непротиворечивость перемещений рабочих органов оборудования при осуществлении механообработки на соответствующих технологических переходах.

Обозначим множество допустимых вариантов порядков обработки на i -м технологическом переходе как $O_i = \{O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,n}\}$, множество допустимых вариантов порядков обработки на j -м технологическом переходе как $O_j = \{O_{j,1}, O_{j,2}, \dots, O_{j,m}\}$. Тогда возможность параллельной обработки возникает при выполнении условия $O(i, j) = O_i \cap O_j \neq \emptyset$, это означает, что для разных обрабатываемых поверхностей, заданных в рамках реализации i -го и j -го технологических переходов, существуют одинаковые варианты порядков обработки, что дает возможность при неизменных режимах резания вести параллельную обработку данных поверхностей.

Вместе с тем проводится дополнительная проверка вариантов последовательностей обработки из множества $O(i, j)$ на предмет удовлетворения ограничений по суммарному усилию резания и суммарной мощности, которые не могут превышать технологические возможности оборудования.

В результате выполненных проверок на выходе процедуры генерируется множество вариантов структур технологических операций, учитывающих возможность параллельной реализации технологических переходов. Последующие этапы проектирования структур операций направлены на выбор вариантов по критериям экономической эффективности. На данном этапе планирования ТП предложено использовать показатели, отражающие затраты времени на обработку по тому или иному варианту технологической операции.

2. Разработка методики отсева нерациональных вариантов структур технологических операций

Наибольшая эффективность технологической операции на оборудовании токарной группы достигается за счет параллельной обработки, поэтому для отсева нерациональных вариантов структур технологических операций целесообразно применить показатель параллельности реализации технологических переходов в операции K_s , расчет которого для каждого варианта последовательности технологических переходов в кортеже осуществляется следующим образом:

$$K_{s(i,j)} = b_{s(j)} / b_i,$$

где i – идентификатор кортежа технологических переходов; j – идентификатор варианта последовательности технологических переходов в кортеже; b_s – количество связей между технологическими переходами, допускающими параллельную обработку; b_i – суммарное количество связей между технологическими переходами в i -м кортеже. В данном контексте связи между технологическими переходами – это условные обозначения «+» или «–» в сформированных ранее последовательностях технологических переходов.

Чтобы представить взаимодействия между элементами сложных динамических систем, возникающие при решении данной задачи, разумно использовать теорию графов для построения графической модели. Для этого сфор-

мируем из сгенерированных ранее вариантов последовательностей технологических переходов ориентированный граф (рис. 4).

Граф возможных последовательностей обработки $G = (C, B, S, F)$, где C – множество вершин, представляющих технологические переходы в кортеже; B – множество дуг, определяющих последовательность выполнения связанных технологических переходов (например дуга (C_1, C_3) обозначает, что технологический переход C_1 должен быть выполнен перед технологическим переходом C_3); S – множество, определяющее «раскраску» соответствующих дуг, формируется на основе сгенерированных вариантов последовательностей технологических переходов (условное обозначение пунктирной линией указывает на возможность параллельного выполнения, а сплошной линией – необходимость последовательного выполнения технологических переходов); F – функция, задающая раскраску графа на основе логических правил, заложенных в базе технологических знаний САПМ ТП. По выполнению для каждого i -го кортежа процедуры генерации возможных вариантов структур технологических операций имеется множество $P_i = \{P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,j}, \dots\}$ вариантов порядка выполнения технологических переходов. Каждый вариант записывается в виде $P_{i,j} = (C_x - C_y + C_z \dots)$, где $x = 1 \dots n$, $y = 1 \dots n$, $z = 1 \dots n$, «+» означает возможность параллельной реализации технологических переходов C_y и C_z , а «-» показывает необходимость последовательного выполнения сначала технологического перехода C_x , а затем группы технологических переходов $C_y + C_z$.

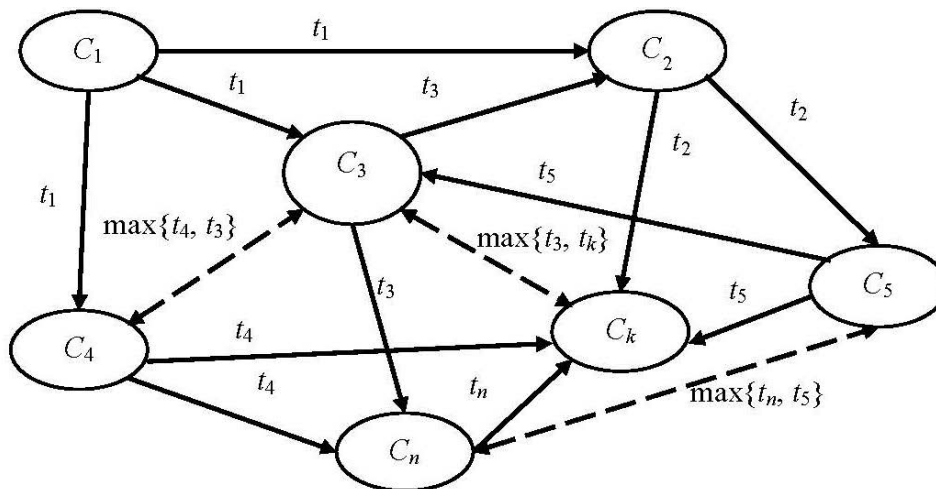


Рис. 4. Пример формирования графа для моделирования процедур отсева нерациональных вариантов и выбора рациональных вариантов структур технологических операций

Таким образом, задача отсева нерациональных вариантов структур технологических операций решается путем нахождения маршрутов в графе, в состав которых входят ребра, отражающие возможность параллельной обработки. Для таких маршрутов значение показателя параллельности реализации технологических переходов будет больше нуля. Однако в случае формирования по результатам отсева пустого множества на последующие этапы передается множество полученных в процедуре генерации возможных вариантов структур технологических операций.

3. Методика выбора рациональных вариантов структур технологических операций

По итогам процедуры отсева формируется множество предпочтительных вариантов последовательностей технологических переходов в операции. Однако для выбора окончательных вариантов для каждого кортежа технологических переходов необходимо учитывать требования технико-экономической эффективности. С этой целью предложено использовать основное время технологической операции в качестве критерия оценки эффективности механообработки.

Для моделирования процедуры выбора рациональных вариантов структур технологических операций воспользуемся сформированным ранее графом G (рис. 4), внося в него количественное выражение взаимосвязей между вершинами, которое и будет отражать основное время обработки на технологическом переходе, обозначенном в вершине с исходящей дугой. В случае, когда вершины соединены дугой, показывающей возможность параллельной реализации технологических переходов, выбирается лимитирующее (максимальное) основное время реализуемых параллельно технологических переходов.

Таким образом, решение задачи выбора рациональных вариантов структур технологических операций сводится к поиску кратчайшего маршрута в графе G , в котором под «расстояниями» между вершинами подразумевается основное время реализации соответствующих технологических переходов.

Заключение

Предложенные модели и методики позволяют формализовать проектные процедуры для формирования рациональных структур технологических операций для оборудования токарной группы и обуславливают необходимость разработки программно-алгоритмического обеспечения для автоматизации данного этапа проектирования, что обеспечит существенное сокращение времени разработки технологических операций, повышение качества проектных решений, снижение себестоимости изготовления деталей.

Библиографический список

1. **Cay, F.** An IT view on perspectives of computer aided process planning research / F. Cay, C. Chassapis // Computers in Industry. – 1997. – № 34 (3). – P. 307–337.
2. **Yusri, Yu.** Survey on computer-aided process planning / Yu. Yusri, L. Kamran // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – № 75. – P. 77–89.
3. **Вашкевич, Н. П.** САПР ТП токарной обработки: структура и функциональные возможности / Н. П. Вашкевич, В. Н. Дубинин, С. Л. Зверев // Вычислительная техника в автоматизированных системах контроля и управления : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 25. – Пенза : ПГУ, 1998. – С. 60–67.
4. **Бочкарев, П. Ю.** Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 10–14.
5. **Митин, С. Г.** Принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 2 (32-2). – С. 117–122.

6. **Митин, С. Г.** Генерация возможных вариантов структур технологических операций с применением аппарата теории графов / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Технология машиностроения*. – 2012. – № 4. – С. 69–73.
7. **Митин, С. Г.** Подсистема проектирования рациональной структуры технологических операций для оборудования фрезерной группы / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2009. – № 3 (41). – С. 141–144.
8. **Разманова, Т. И.** Автоматизация проектирования структуры технологической операции для оборудования сверлильной группы / Т. И. Разманова, С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2012. – № 11. – С. 74–78.
9. **Шалунов, В. В.** Автоматизированное проектирование технологических операций, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного точения с ЧПУ / В. В. Шалунов, Д. В. Комаревцев, И. М. Семенихин // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 3, № 2 (58). – С. 146–150.
10. **Wu, R. R.** Optimal operation planning using fuzzy Petri nets with resource constraints / R. R. Wu, L. Ma, L. Mathew, G. H. Duan // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2002. – № 15 (1). – P. 28–36.
11. **Kasirolvalad, Z.** An intelligent modular modelling approach for quality control of CNC machines product using adaptive fuzzy Petri nets / Z. Kasirolvalad, M. J. Motlagh, M. Shadmani // 8th Control, automation, robotics and vision conference, ICARCV. – IEEE. – 2004. – Vol. 2. – P. 1342–1347.
12. **Canales, J. C.** Fuzzy knowledge learning via adaptive fuzzy petri net with triangular function model / J. C. Canales, X. Li, W. Yu // The sixth world congress on intelligent control and automation, WCICA. – IEEE. – 2006. – Vol. 1. – P. 4249–4253.

References

1. Cay F., Chassapis C. *Computers in Industry*. 1997, no. 34 (3), pp. 307–337.
2. Yusri Yu., Kamran L. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, no. 75, pp. 77–89.
3. Vashkevich N. P., Dubinin V. N., Zverev S. L. *Vychislitel'naya tekhnika v avtomatizirovannykh sistemakh kontrolya i upravleniya: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Computer engineering in automated control and management systems: proceedings of universities]. Issue 25. Penza: PGU, 1998, pp. 60–67.
4. Bochkarev P. Yu. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of machine building]. 2002, no. 1, pp. 10–14.
5. Mitin S. G., Bochkarev P. Yu. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Togliatti State University]. 2015, no. 2 (32-2), pp. 117–122.
6. Mitin S. G., Bochkarev P. Yu. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of machine building]. 2012, no. 4, pp. 69–73.
7. Mitin S. G., Bochkarev P. Yu. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2009, no. 3 (41), pp. 141–144.
8. Razmanova T. I., Mitin S. G., Bochkarev P. Yu. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of universities. Machine building.]. 2012, no. 11, pp. 74–78.
9. Shalunov V. V., Komarevtsev D. V., Semenukhin I. M. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2011, vol. 3, no. 2 (58), pp. 146–150.
10. Wu R. R., Ma L., Mathew L., Duan G. H. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2002, no. 15 (1), pp. 28–36.
11. Kasirolvalad Z., Motlagh M. J., Shadmani M. *8th Control, automation, robotics and vision conference, ICARCV. IEEE*. 2004, vol. 2, pp. 1342–1347.

12. Canales J. C., Li X., Yu W. *The sixth world congress on intelligent control and automation, WCICA*. IEEE. 2006, vol. 1, pp. 4249–4253.

Митин Сергей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: ser_gen@inbox.ru

Mitin Sergey Gennad'evich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of automation, management, mechatronics,
Saratov State Technical University
(77 Politekhnicheskaya street,
Saratov, Russia)

Бочкарев Петр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра технической механики и деталей
машин, Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: bpy@mail.ru

Bochkarev Petr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of technical mechanics
and machine parts, Saratov State
Technical University
(77 Politekhnicheskaya street,
Saratov, Russia)

УДК 621.7:658.12

Митин, С. Г.

Модели и методики автоматизации процедур разработки структур технологических операций, реализуемых на оборудовании токарной группы / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 119–130. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-11.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИНЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ВЫСОКОВЛАЖНОГО БИОЛОГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ В СРАВНЕНИИ С АНАЛОГОМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предприятия сельскохозяйственных отраслей и пищевой промышленности остро нуждаются в передовых технологиях и эффективных перерабатывающих машинах для сохранения продукции. Одним из традиционных способов сохранения является снижение влажности биологического сырья и готовых продуктов. Для обработки высоковлажных продуктов применяются машины тепловой и радиационной сушки.

Материалы и методы. Представлена машина цилиндрического типа для инфракрасной сушки высоковлажного биологического сырья, описан технологический процесс. Отличительной особенностью машины для сушки является использование низкотемпературных пленочных электронагревателей и конструкция корпуса. Проведено экспериментальное сравнение представленной машины с радиационно-конвективным аналогом, выполнены замеры энергопотребления и органолептическая оценка высушенного материала. Для исследований в качестве материала для сушки применялся томат как наиболее яркий представитель высоковлажного биологического сырья.

Результаты. В результате проведенных экспериментов выполнена всесторонняя оценка машины цилиндрического типа для сушки высоковлажного биологического сырья в сравнении с аналогом. Зафиксировано фактическое энергопотребление, количество испаренной влаги, количество брака готовой продукции, дана органолептическая оценка образцов, а также заключение лабораторных испытаний Московской государственной академии ветеринарной медицины и биотехнологии имени К. И. Скрябина.

Выводы. Выбранный тип инфракрасных излучателей и геометрическая форма корпуса обеспечивают круговое воздействие инфракрасного излучения и исключают необходимость перемешивания сырья, что повышает качество готового продукта и упрощает конструкцию машины. Исследования показали, что использование низкотемпературных пленочных электронагревателей для сушки высоковлажного биологического сырья возможно, при этом витамины и ценные вещества не разрушаются, а сроки хранения готовой продукции увеличиваются. Согласно полученному заключению образцы готовой продукции полностью соответствуют международным стандартам. Экспериментальное сравнение с радиационно-конвективным аналогом подтвердило высокую энергоэффективность машины цилиндрического типа для инфракрасной сушки.

Ключевые слова: машина для сушки, машина для инфракрасной сушки высоковлажного сырья, ИК-излучатель, биологическое сырье, высоковлажное сырье, энергоэффективность, аналог.

V. M. Popov, V. A. Afon'kina, V. N. Levinskiy, V. I. Mayorov

DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENCY OF A CYLINDRICAL TYPE MACHINE FOR INFRARED DRYING OF A HIGHLY MOBILE BIOLOGICAL RAW MATERIAL IN COMPARISON WITH ANALOG

Abstract.

Background. Enterprises of agricultural industries and the food industry are in dire need of advanced technologies and efficient processing machines for the preservation of production. One of the traditional ways of conservation is to reduce the moisture content of biological raw materials and finished products. Machines for thermal and radiation drying are used for processing high-moisture products.

Materials and methods. The article presents a cylindrical type machine for infrared drying of high-moisture biological raw materials, the technological process is described. A distinctive feature of the drying machine is the use of low-temperature film heaters and the construction of the housing. An experimental comparison of the presented machine with a radiation-convective analogue was performed, energy consumption measurements and an organoleptic evaluation of the dried material were performed. For research as a material for drying, tomato was used as the brightest representative of high-moisture biological raw materials.

Results. As a result of the conducted experiments, a comprehensive evaluation of a cylindrical type machine for drying high-moisture biological raw materials in comparison with an analogue was carried out. The actual energy consumption, the amount of evaporated moisture, the quantity of finished products, the organoleptic evaluation of the samples, and the conclusion of laboratory tests of the Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology named after K.I. Skryabin were recorded.

Conclusions. The selected type of IR emitters and the geometric shape of the housing provide a circular effect of infrared radiation and exclude the need for mixing of raw materials, which increases the quality of the finished product and simplifies the design of the machine. Studies have shown that the use of low-temperature film electric heaters for drying high-moisture biological raw materials is possible, while vitamins and valuable substances are not destroyed, and the shelf life of finished products increases. According to the received conclusion, the samples of finished products fully comply with international standards. An experimental comparison with a radiation-convective analog confirmed the high energy efficiency of a cylindrical-type machine. For infrared drying.

Key words: drying machine, infra-red drying machine for high-moisture raw materials, infra-red radiating element, biological raw materials, high-moisture raw materials, energy efficiency, analogue.

Введение

Проблема снижения влажности сырья и материалов актуальна для многих отраслей экономики. Особенно важное значение она имеет для сельского хозяйства и перерабатывающих отраслей, так как снижение влажности непосредственно связано с повышением сохранности и увеличением сроков хранения плодоовощной и прочей продукции. В последние десятилетия для решения этой задачи были разработаны многочисленные технологии снижения влажности различных продуктов, а использование последних достижений в машиностроительной и электротехнической отраслях позволяет

усовершенствовать старые и создавать принципиально новые, более эффективные машины для сушки продуктов.

Машины для сушки сельскохозяйственной продукции классифицируются по целому ряду признаков, важнейшим среди которых является способ подвода тепла к влажному материалу. По этому признаку можно выделить конвективные машины для сушки (высушиваемый материал омывается потоком предварительно нагретого сушильного агента), машины для контактной сушки (осуществляется непосредственный контакт высушиваемого материала с нагреваемой поверхностью), машины для радиационной сушки (высушивание происходит под воздействием инфракрасного (ИК) излучения либо электромагнитного поля высокой и сверхвысокой частот) [1].

При сушке высоковлажного биологического сырья (овощи, фрукты, мясо, рыба и т.п.) весьма перспективно использовать инфракрасное излучение, имеющее ряд важных отличий от классических методов нагрева. Во-первых, не требуется наличия теплоносителя, способствующего загрязнению обрабатываемого продукта. Во-вторых, продукт не перегревается вблизи теплопередающих поверхностей, так как тепловыделение происходит в объеме продукта, и его температура выше температуры стенок машины для сушки. В-третьих, интенсивность нагрева не зависит от агрегатного состояния продукта, а только от его оптических и диэлектрических свойств. При использовании ИК-нагрева интенсивность процесса сушки увеличивается в 1,5–2,0 раза с одновременным снижением энергозатрат в 1,5 раза, однако применение этого способа сушки высоковлажного биологического сырья сопряжено с рядом трудностей, главной из которых является оптимальное размещение ИК-излучателя относительно продукта [2].

ИК-излучатель является одной из основных частей машины для инфракрасной сушки. Эффективность установок данного типа во многом зависит от свойств и эксплуатационного режима выбранного ИК-излучателя [3]. При разработке машины для инфракрасной сушки был выбран низкотемпературный пленочный электронагреватель (НЭП), так как ИК-излучатель этого типа способен обеспечить высокую плотность потока в диапазоне длин волн от 8 до 9,5 мкм [4, 5]. Кроме того, пленочный электронагреватель – единственный ИК-излучатель, допускающий изменение своей геометрической формы.

С учетом свойств и особенностей пленочного ИК-излучателя при разработке конструкторской документации машины для сушки за основу взят цилиндрический корпус, а электронагреватель размещен на его стенках [6].

Техническим результатом предлагаемой машины для инфракрасной сушки является:

- повышение качества высушиваемого продукта за счет одновременно-го воздействия ИК-излучения со всех сторон;
- снижение энергетических затрат, так как энергия излучения электронагревателя концентрируется в заданной локальной области.

На основании разработанной конструкторской документации машины для сушки цилиндрической формы изготовлен опытный образец рис. 1 [7, 8].

На данном образце проведено два эксперимента с целью оценки применимости инфракрасной сушки высоковлажного биологического сырья (на примере томатов) и с целью определения энергоэффективности разрабатываемой машины для сушки в сравнении с аналогами.

1. Методика и материалы

Для проведения первого этапа экспериментов использовался 1 кг томатов, размер каждого не превышал 3 см в диаметре. Томаты поместили в емкость объемом 10 л, тщательно вымыли, после чего была произведена сортировка и выбраковка: для эксперимента были отобраны экземпляры, имеющие одинаковый размер и правильную форму, не поврежденные, без помятостей и гнили. Отобранные томаты были разрезаны на четвертинки и взвешены, общий вес составил 0,930 кг.



Рис. 1. Опытный образец машины для сушки

Порезанные томаты были помещены в прогретую машину. Сушка продолжалась 52 ч, выход готового продукта составил 0,120 кг. Полученному продукту была дана органолептическая оценка – по всем показателям «отлично». Для дальнейших лабораторных испытаний готовый продукт был отправлен в Московскую государственную академию ветеринарной медицины и биотехнологии имени К. И. Скрябина. По итогам испытаний было выдано заключение: «сушеный томат» в объеме проведенных испытаний соответствует требованиям Стандарта ЕЭК ООН DDP-19, регламентирующего сбыт и контроль товарного качества сушеных томатов [9, 10].

После полученных положительных результатов первого этапа экспериментов был проведен второй этап, направленный на определение энергоэффективности разрабатываемой машины для сушки в сравнении с аналогами. В качестве аналога была выбрана радиационно-конвективная машина для

сушки «УРАЛ» (рис. 2). В табл. 1 рассмотрены технические характеристики опытного образца и машины для сушки «УРАЛ».



Рис. 2. Машина для сушки «УРАЛ»

Таблица 1

Технические характеристики опытного образца и машины для сушки «УРАЛ».

Наименование технического параметра	«УРАЛ»	Опытный образец машины для сушки
Номинальное напряжение, В	220	220
Объем рабочей камеры, м ³	0,06	0,15
Способ загрузки материала	лотки	подвес
Количество нагревательных элементов, шт.	4 / 350	1 / 380
/ мощность, Вт		1 / 100
Установленная мощность, Вт	1400	500

Подготовительные операции с продуктом проводились согласно методике проведения первого эксперимента, единственным отличием стало количество использованного продукта – 4,2 кг, которые после всех этапов подготовки были поделены на две равных части по 2,142 кг.

Первая часть была помещена на два сетчатых лотка установки «УРАЛ», а вторая часть была помещена в опытный образец машины для сушки. Обе установки были предварительно прогреты и выведены на рабочий режим. Температура в установке «УРАЛ» не регулируется, но дополнительно в машине был установлен регулируемый контроллер температуры с выносным датчиком для измерения температуры воздуха в камере. На обеих машинах для сушки задавалась температура воздуха в пределах 27–32 °С. В процессе проведения эксперимента постоянно измерялись три параметра: температура воздуха в камере, температура нагревателя и температура продукта.

2. Результаты

Значения температуры, полученные в результате измерений во время проведения эксперимента, приведены на температурно-временных графиках рис. 3, 4, конечные результаты экспериментов представлены в табл. 2.

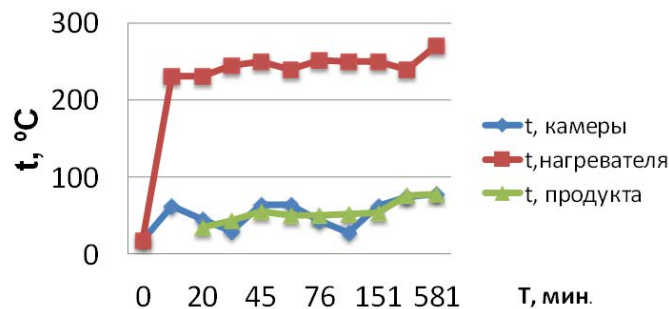


Рис. 3. Температурно-временной график при сушке томатов в установке «УРАЛ»

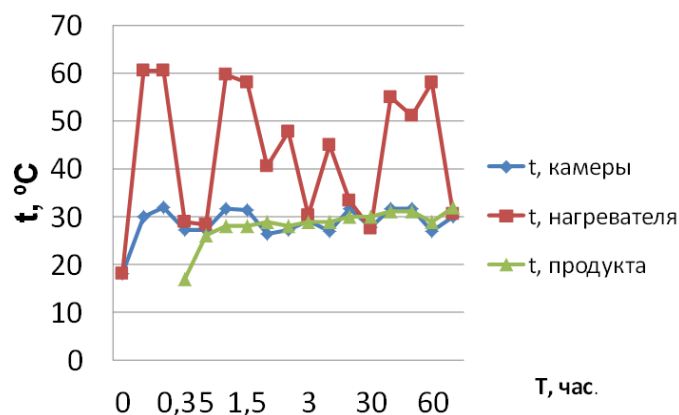


Рис. 4. Температурно-временной график сушки томатов в опытном образце машины

Таблица 2

Результаты экспериментов сушки высоковлажного биологического сырья (на примере томатов)

Параметр	Общие значения для сушилок			
$t_{\text{помещения}}$	+19			
ϕ	62 %			
	УРАЛ		Опытный образец машины для сушки	
	Начало	Конец	Начало	Конец
m , кг	2,142	0,185	2,142	0,192
W_n , кВт · ч	0	12,8	0	6,3
Количество испаренной влаги	1,957		1,95	
Брак, %	50		3	

3. Обсуждение

Из температурно-временного графика на рис. 3 видно, что сушка проходила при высокой температуре нагревателя (250 °С), при этом температура в камере периодически, но незначительно превышала температуру продукта, а ближе к концу процесса сушки эти параметры выходили на одинаковые значения. И несмотря на регулирование температурного режима, заметна большая инерционность процесса сушки.

Из рис. 4 видно, что почти на всем протяжении сушки температура камеры равна или ниже температуры продукта, при этом весь процесс сушки проходил в режиме низких температур (не более 60 °С).

Анализ результатов:

1. Для машины сушки «УРАЛ»: время сушки томатов составляет 9,6 ч, при этом затрачено 12,8 кВт · ч электроэнергии; количество испаренной влаги – 1,957 кг. Органолептическая оценка: цвет – 2, вкус – 3, запах – 3, текстура – очень твердая, согласно Стандарту ЕЭК ООН-19 соответствует пониженному содержанию влаги.

2. Для опытного образца: время сушки томатов в спроектированной машине составляет 42 ч, при этом затрачено 6,3 кВт · ч электроэнергии; количество испаренной влаги – 1,655 кг. Органолептическая оценка: цвет – 5, вкус – 5, запах – 5, текстура – твердая, но гибкая, что согласно Стандарту ЕЭК ООН-19 соответствует нормальному содержанию влаги.

Заключение

Сушка высоковлажного биологического сырья с использованием низкотемпературного пленочного электрического нагревателя, расположенного в корпусе цилиндрической формы, возможна, что подтверждено лабораторными испытаниями, и соответствует установленному стандарту.

Сравнение с аналогом – машиной для сушки «УРАЛ» – показало, что по результатам экспериментов опытный образец превосходит аналог по органолептической оценке, по количеству брака и более чем в 2 раза по энергетическим затратам на сушку одинакового объема высушенной продукции.

Библиографический список

1. **Анатазевич, В. И.** Сушка пищевых продуктов : справочное пособие / В. И. Антазевич. – М. : ДеЛи, 2000. – 294 с.
2. **Чернышев, С. В.** Разработка и научное обоснование технологии сушеных томатов : дис. ... д-ра техн. наук / Чернышев С. В. – Кишинев, 2011. – С. 16–28.
3. **Карпов, В. Н.** Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК. Прикладная теория и частные методики / В. Н. Карпов, С. А. Ракутько. – СПб. : СПбГАУ, 2009. – 100 с.
4. Пат. 2010115793 Российская Федерация, 100353 RU H05B 3/36. Пленочный электронагреватель / Полевой Б. Г., Попов В. М. ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.
5. **Афонькина, В. А.** Инфракрасная сушка термолабильного сырья на примере зеленых культур : дис. ... канд. техн. наук / Афонькина В. А. – Челябинск, 2014. – С. 54–62.
6. **Левинский, В. Н.** Разработка сушильной установки высоковлажного биологического сырья с применением пленочных электронагревателей / В. Н. Левинский, В. М. Попов, В. А. Афонькина // Агрокомплекс-2016 : материалы науч.-

- практ. конф. в рамках XXVI Междунар. специализированной выставки. – Уфа, 2016. – Ч. III. – С. 34–39.
7. **Попов В. М.** Инфракрасная сушильная установка высоковлажного биологического сырья / В. М. Попов, В. А. Афонькина, В. Н. Левинский, Е. И. Шукшина // Научные проекты Южно-Уральского аграрного университета. – Челябинск, 2016. – С. 73–75.
 8. Пат. 2596918 Российская Федерация. Установка для сушки высоковлажных материалов / Попов В. М., Афонькина В. А., Шукшина Е. И., Левинский В. Н., Майоров В. И.; заявл. 26.05.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25.
 9. **Попов В. М.** К вопросу об инфракрасной сушке томатов / В. М. Попов, В. А. Афонькина, В. Н. Левинский // Достижения науки – агропромышленному производству : материалы 55 Междунар. науч.-техн. конф. – Челябинск : Изд-во ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2016. – С. 267–274.
 10. Стандарт ЕЭК ООН DDP-19, касающийся сбыта и контроля товарного качества сушеных томатов от 09 ноября 2007 г. – М., 2007.

References

1. Anatazevich V. I. *Sushka pishchevykh produktov: spravocnoe posobie* [Food drying: reference guide]. Moscow: DeLi, 2000, 294 p.
2. Chernyshev S. V. *Razrabotka i nauchnoe obosnovanie tekhnologii sushenykh tomatov: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development and scientific substantiation of dried tomato technology: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Kishinev, 2011, pp. 16–28.
3. Karpov V. N., Rakut'ko S. A. *Energosberezhenie v opticheskikh elektrotekhnologiyakh APK. Prikladnaya teoriya i chastnye metodiki* [Energy saving in optical electrotechnologies of agrarian and industrial complex. Applied theory and particular techniques]. Saint-Petersburg: SPbGAU, 2009, 100 p.
4. *Pat. 2010115793 Rossiyskaya Federatsiya, 100353 RU H05B 3/36. Plenochnyy elektronagrevatel'* [Patent 2010115793 of the Russian Federation, 100353 RU H05B 3/36. Film electric heater]. Polevoy B. G., Popov V. M.; appl. 20.04.2010; publ. 10.12.2010, Bul. № 34.
5. Afon'kina V. A. *Infrakrasnaya sushka termolabil'nogo syr'ya na primere zelenykh kul'tur: dis. kand. tekhn. nauk* [Infrared drying of thermolabile raw materials on the example of green cultures: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Chelyabinsk, 2014, pp. 54–62.
6. Levinskiy V. N., Popov V. M., Afon'kina V. A. *Agrokompleks-2016: materialy nauch.-prakt. konf. v ramkakh XXVI Mezhdunar. spetsializirovannoy vystavki* [Agrokompleks-2016: proceedings of the scientific and practical conference within the XXVI International specialized exhibition]. Ufa, 2016, part III, pp. 34–39.
7. Popov V. M., Afon'kina V. A., Levinskiy V. N., Shukshina E. I. *Nauchnye proekty Yuzhno-Ural'skogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of South-Ural State Agro University]. Chelyabinsk, 2016, pp. 73–75.
8. *Pat. 2596918 Rossiyskaya Federatsiya. Ustanovka dlya sushki vysokovlazhnykh materialov* [Patent 2596918 of the Russian Federation. Installation for drying high-moisture materials]. Popov V. M., Afon'kina V. A., Shukshina E. I., Levinskiy V. N., Mayorov V. I.; appl. 26.05.2015; publ. 10.09.2016, Bul. № 25.
9. Popov V. M., Afon'kina V. A., Levinskiy V. N. *Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu: materialy 55 Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Achievements of science - agro-industrial production: proceedings of the 55th International scientific and engineering conference]. Chelyabinsk: Izd-vo FGBOU VO Yuzhno-Ural'skiy GAU, 2016, pp. 267–274.

10. Standart EEK OON DDP-19, kasayushchiysya sbyta i kontrolya tovarnogo kachestva sushenykh tomatov ot 09 noyabrya 2007 g. [EEK OON DDP-19 standard concerning the marketing and control of the commercial quality of dried tomatoes dated 9th of November, 2007]. Moscow, 2007.

Попов Виталий Матвеевич

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой энергообеспечения
и автоматизации технологических
процессов, Южно-Уральский
государственный аграрный университет
(Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 75)

E-mail: ntc-es@mail.ru

Popov Vitaliy Matveevich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of energy and process automation,
South-Ural State Agro University
(75 Lenina avenue, Chelyabinsk, Russia)

Афонькина Валентина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра энергообеспечения
и автоматизации технологических
процессов, Южно-Уральский
государственный аграрный университет
(Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 75)

E-mail: Afva82@mail.ru

Afon'kina Valentina Aleksandrovna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of energy
and process automation, South-Ural
State Agro University (75 Lenina
avenue, Chelyabinsk, Russia)

Левинский Василий Николаевич

лаборант, кафедра энергообеспечения
и автоматизации технологических
процессов, Южно-Уральский
государственный аграрный университет
(Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 75)

E-mail: lv_74rus@mail.ru

Levinskiy Vasiliy Nikolaevich

Laboratory assistant, sub-department
of energy and process automation, South-
Ural State Agro University (75 Lenina ave-
nue, Chelyabinsk, Russia)

Майоров Владимир Иванович

доктор юридических наук, профессор,
кафедра административного
и финансового права, Тюменский
государственный университет (Россия,
г. Тюмень, ул. Володарского, 6)

E-mail: 1955715@rambler.ru

Mayorov Vladimir Ivanovich

Doctor of juridical sciences, professor,
sub-department of administrative
and financial law, Tyumen State University
(6 Volodarskogo street, Tyumen, Russia)

УДК 621.365.46: 664.83/85.039.51

Попов, В. М.

Определение энергоэффективности машины цилиндрического типа для инфракрасной сушки высоковлажного биологического сырья в сравнении с аналогом / В. М. Попов, В. А. Афонькина, В. Н. Левинский, В. И. Майоров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 131–139. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-12.

УДК 621.8

DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-13

С. Н. Алехин, А. С. Алехин, С. П. Петросов, В. В. Никишин

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА УРАВНОВЕШИВАНИЯ В ЖИДКОСТНОМ АВТОБАЛАНСИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ СТИРАЛЬНЫХ МАШИН

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является жидкостное автобалансирующее устройство пассивного типа барабанных стиральных машин. Предметом исследования являются процессы и условия уравновешивания неуравновешенных масс текстильных изделий при центробежном отжиме в стиральных машинах с горизонтальной осью вращения. Цель работы – определить условия, реализация которых позволит обеспечить уравновешивание неуравновешенных масс в период центробежного отжима во всем диапазоне частот вращения барабана.

Материалы и методы. Рассматриваются вопросы формирования неуравновешенной и уравновешивающей сил в стиральном барабане с автобалансирующим устройством, и факторы, определяющие асимптотику входного силового воздействия и силового отклика рассматриваемой системы, что позволяет определить условия, необходимые для полного уравновешивания неуравновешенных масс барабана при отжиме.

Результаты. Исследованы факторы, определяющие асимптотику входного силового воздействия и силового отклика рассматриваемой системы, получены формулы для определения неуравновешенной и уравновешивающей сил, а также параметров, характеризующих процессы их формирования. Описаны условия, при которых возможна реализация полного уравновешивания неуравновешенных масс барабана при отжиме.

Выводы. Установлено, что использование упругих элементов автобалансирующего устройства с постоянной жесткостью не обеспечивает полного уравновешивания системы. Показано, что основным исходным параметром при расчете силовых факторов, соответствующих условиям уравновешивания системы, является перемещение внутренней емкости автобалансирующего устройства. Установлено, что для обеспечения полного уравновешивания неуравновешенных масс барабана в процессе отжима необходимо использование упругих элементов автобалансирующего устройства с нелинейной степенной квадратичной характеристикой (параболой второго порядка).

Ключевые слова: стиральная машина, виброактивность, автобалансирующее устройство, центробежный отжим, уравновешивание.

S. N. Alekhin, A. S. Alekhin, S. P. Petrosov, V. V. Nikishin

STUDY OF THE CONDITIONS PROCESS OF EQUILIBRATION IN THE LIQUID AUTOBALANCING DEVICE FOR WASHING MACHINES

© 2018 Алехин С. Н., Алехин А. С., Петросов С. П., Никишин В. В. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The object of study is the liquid autobalancing device of passive type drum washing machines. The subject of research are the processes and conditions for balancing unbalanced masses of the textile articles at a centrifugal spinning in washing machines with a horizontal rest axis of rotation. The aim of this work is to define the conditions, the implementation of which allows to provide balancing of unbalanced masses in the period of centrifugal extraction throughout the range of frequencies of rotation of the drum.

Materials and methods. Consider question the formation of unbalanced and balance forces in a washing drum with autobalancer device, and the factors that determine the asymptotics of input power impact power response of the system, which allows to determine the conditions necessary for complete balancing of the unbalanced masses of the drum during the spin cycle.

Results. Investigated the factors that determine the asymptotics of input power impact power response of the system under consideration, the formulas for determining unbalanced and balances, as well as the parameters describing the processes of their formation. Describes the conditions under which a possible implementation of the full balance the unbalanced mass of the drum during the spin cycle.

Conclusions. The use of elastic elements autobalancing device with a constant stiffness does not provide a complete trim system. It is shown that as the primary source parameter in the calculation of power factors respective to conditions of equilibration of the system is to move the internal capacity autobalancing device. Found that to ensure complete balancing of the unbalanced mass of the drum in the pressing process requires the use of elastic elements autobalancing device with a nonlinear exponential characteristic quadratic (a parabola of the second order).

Key words: washing machine, vibroactivity, autobalancing device, centrifugal pressing, trim.

Введение

Снижение виброактивности стиральных машин барабанного типа при центробежном отжиме текстильных изделий является в настоящее время одним из приоритетных направлений их совершенствования.

Наиболее эффективным методом борьбы с вибрацией в стиральных машинах барабанного типа является виброзащита снижением виброактивности источника колебаний [1]. Для роторных машин, к которым относятся и стиральные машины барабанного типа, это, в первую очередь, балансировка неуравновешенных масс. Различные, случайные значения параметров, характеризующих процесс отжима в каждом отдельном цикле обработки текстильных изделий, не позволяют произвести балансировку неуравновешенных масс стирального барабана перед началом операции отжима либо в процессе выполнения отжима при временной вынужденной остановке вращения барабана. В подобных случаях, т.е. для роторов с изменяющейся массой или геометрией, применяют специальные методы балансировки, в частности, автоматическую балансировку на ходу.

Автобалансирующие устройства (АБУ) находят все более широкое применение в стиральных машинах. Однако в настоящее время доля стиральных машин, использующих АБУ, остается все же незначительной. Как показал анализ отечественных и зарубежных научных публикаций [2–6] и др., это связано с рядом причин, из которых необходимо выделить следующие:

– конструктивные недостатки, связанные, в частности, с тем, что для более эффективной работы АБУ чаще всего приходится усложнять конструкцию устройства до уровня АБУ активного типа, что экономически не всегда выгодно, а при использовании более простой конструкции (уровня АБУ пассивного типа) чаще всего приходится сталкиваться со снижением эффективности АБУ;

– практически все известные конструкции АБУ пассивного типа и значительная часть АБУ активного типа позволяют реализовать функцию уравнивания лишь в определенном диапазоне частот вращения барабана;

– недостаток научных исследований, посвященных обоснованию и выбору рациональных конструктивных и режимных параметров АБУ, обеспечивающих наиболее эффективный процесс уравнивания.

1. Цель и задачи исследования

Анализ современных конструкций АБУ показал, что одними из наиболее перспективных устройств являются жидкостные АБУ пассивного типа, которые отличают простота конструкции и достаточно высокая степень их эффективности.

В последнее время была разработана оригинальная конструкция жидкостного АБУ пассивного типа различных модификаций [7–10], позволяющая, как указывают авторы, повысить эффективность процессов уравнивания при относительно несложной конструкции устройства. Характерной особенностью данных АБУ является то, что стиральный барабан состоит из двух частей (внутренней и наружной), коаксиально расположенных внутри бака на валу привода, причем внутренняя часть представляет собой цилиндрическую емкость с зонами перфорации и гребнями на внутренней поверхности и имеет возможность поперечного перемещения за счет упругой связи с наружной частью барабана, а пространство, образованное между стенками внутренней емкости и наружной части барабана, представляет собой замкнутую герметичную полость, ограниченную эластичными элементами и заполненную без пустот рабочей (уравнивающей) жидкостью, выполняющей роль уравнивающей массы.

На рис. 1 показана схема, поясняющая принцип работы АБУ данного типа, где перемещение Δl внутренней емкости происходит при силовом воздействии на нее центробежной силы $F_{ц.б}$ от неуравновешенных масс текстильных изделий (белья) $m_б$ в период центробежного отжима. Перемещение внутренней емкости приводит к формированию дополнительной неуравновешенной силы $F_{ц.в}$ за счет образования эксцентриситета внутренней емкости, равного ее перемещению Δl . Таким образом, на наружную емкость через упругую связь действует суммарное усилие от неуравновешенных масс барабана $F_{ц} = F_{ц.в} + F_{ц.б}$ – суммарная неуравновешенная (центробежная) сила. Одновременно перемещение внутренней емкости приводит к образованию на противоположной стороне уравнивающей массы и силы F_y .

При разработке данной конструкции АБУ авторами предполагалось, что величине неуравновешенной силе $F_{ц}$ должно соответствовать адекватное перемещение внутренней емкости Δl , а также адекватный отклик системы

в виде равной по величине уравновешивающей силы F_y . Следовательно, предполагалось, что для всех значений $F_{ц}$, т.е. во всем диапазоне частот вращения барабана, должно выполняться условие равенства неуравновешенной и уравновешивающей сил:

$$F_{ц} = F_y.$$



Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемой конструкции жидкостного АБУ пассивного типа: D_n — диаметр наружной емкости; d_v — диаметр внутренней емкости; $r_{e.б}$ — эксцентриситет центра масс текстильных изделий (белья); $r_{e.ж}$ — эксцентриситет центра масс кольца уравновешивающей жидкости; Δl — силовое перемещение внутренней емкости; $F_{ц,б}$ — силовое воздействие на внутреннюю емкость в виде центробежной силы от неуравновешенных масс текстильных изделий (белья); F_y — уравновешивающая сила

Однако предварительные исследования показали, что для обеспечения полного уравновешивания в рассматриваемой системе АБУ необходимо выполнение ряда условий.

Таким образом, данная научная работа посвящена исследованию условий процесса уравновешивания в жидкостном автобалансирующем устройстве стиральных машин.

2. Силовые факторы, определяющие входное силовое воздействие и силовой отклик рассматриваемой системы АБУ

В соответствии со схемой АБУ (рис. 1) центробежная сила $F_{ц}$ представляет собой, как уже было указано выше, суммарное усилие от неуравно-

вешенных масс барабана $F_{ц} = F_{ц,в} + F_{ц,б}$, где $F_{ц,в}$ – центробежная сила от внутренней емкости, $F_{ц,б}$ – центробежная сила от неуравновешенных масс текстильных изделий. Причем неуравновешенная сила $F_{ц}$ направлена вдоль линии действия центробежной силы $F_{ц,б}$ и воздействует, таким образом, через упругие элементы АБУ на ее внешний каркас (наружную емкость) и равна

$$F_{ц} = \omega_B^2 [m_б \Delta l + m_б (r_{е,б} + \Delta l)], \quad (1)$$

или

$$F_{ц} = \omega_B^2 [m_б r_{е,б} + (m_б + m_в) \Delta l], \quad (2)$$

где $m_б$ – масса текстильных изделий (белья); $m_в$ – масса внутренней емкости; ω_B – частота вращения барабана при отжиме; $r_{е,б}$ – эксцентриситет неуравновешенных масс текстильных изделий; Δl – перемещение внутренней емкости.

Основным условием уравнивания, безусловно, является выполнение равенства неуравновешенной $F_{ц}$ и уравнивающей F_y сил:

$$F_{ц}(\tau) = F_y(\tau), \quad (3)$$

где τ – время отжима.

Уравнивающая сила F_y определяется по формуле

$$F_y = m_ж \omega_B^2 r_{е,ж}, \quad (4)$$

где $m_ж$ – масса уравнивающей жидкости; $r_{е,ж}$ – эксцентриситет массы уравнивающей жидкости.

С учетом

$$r_{е,ж} = \frac{d_B^2 \cdot \Delta l}{D_H^2 - d_B^2} \quad (5)$$

получим

$$F_y = m_ж \omega_B^2 \frac{d_B^2 \cdot \Delta l}{D_H^2 - d_B^2}. \quad (6)$$

Представив $m_ж$ через плотность $\rho_ж$ рабочей жидкости и объем $V_ж = \frac{\pi}{4} l_{п} (D_H^2 - d_B^2)$ межстенного пространства герметичной полости (объем рабочей жидкости), где $l_{п}$ – приведенная длина герметичной полости, получим

$$F_y = \rho_ж \frac{\pi}{4} l_{п} (D_H^2 - d_B^2) \frac{d_B^2 \cdot \Delta l}{D_H^2 - d_B^2} \omega_B^2, \quad (7)$$

или после упрощения:

$$F_y = \left(\rho_{\text{ж}} \frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} l_{\text{п}} \right) \Delta l \cdot \omega_{\text{в}}^2. \quad (8)$$

В уравнении (8) переменными параметрами являются перемещение Δl и частота $\omega_{\text{в}}$, а сама функция F_y характеризуется квадратичной зависимостью. В общем случае принято считать, что частота вращения барабана при отжиме изменяется по линейному закону [11]. Таким образом, очевидно, что квадратичной зависимостью также будет описываться и перемещение внутренней емкости Δl .

3. Исследование параметров, определяющих процесс формирования силовых факторов в АБУ

В свою очередь перемещение внутренней емкости Δl зависит от приложенной к внутренней емкости неуравновешенной (центробежной) силы $F_{\text{ц}}$ и жесткости c упругих элементов АБУ:

$$\Delta l = \frac{F_{\text{ц}}}{c}, \quad (9)$$

или с учетом (2):

$$\Delta l = \frac{\omega_{\text{в}}^2 [m_{\text{б}} r_{\text{е.б}} + (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \Delta l]}{c}, \quad (10)$$

откуда после преобразования получим

$$\Delta l = \frac{m_{\text{б}} r_{\text{е.б}} \omega_{\text{в}}^2}{c - (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{в}}^2}. \quad (11)$$

Проверим расчетным путем правомерность полученной формулы (11). Для этого определим для заданных исходных значений конструктивных и режимных параметров стиральной машины величины Δl по формуле (11) в период процесса отжима. Затем, подставив полученные значения Δl в формулы (2) и (8), определим степень совпадения значений функций $F_{\text{ц}}$ и F_y .

Предварительно укажем, что функция (11) имеет смысл при $[c - (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{в}}^2] > 0$. То есть система упругих элементов АБУ будет обеспечивать перемещение внутренней емкости при силовом воздействии на нее неуравновешенной силы $F_{\text{ц}}$ и выполнять свои функции при условии

$$c > (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{в}}^2. \quad (12)$$

Если $c \leq (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{в}}^2$, то жесткость c упругих элементов АБУ будет недостаточной, т.е. при этом перемещение внутренней емкости под воздействием неуравновешенной силы $F_{\text{ц}}$ будет ограничено размерами наружной емкости и функция уравнивания при этом реализована не будет.

Очевидно, что для выбора значения c необходимо исходить из условия, что значение жесткости c должно быть выбрано для максимального значения неуравновешенной силы $F_{\text{ц, max}}$, т.е. исходя из условия

$$c_{\max} > \left[(m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2 \right]_{\max}.$$

Установлено, что максимальное значение неуравновешенной силы $F_{\text{ц, max}}$ наблюдается в момент окончания разгона барабана и начала установившегося режима отжима [12].

Определим значения выражения в правой части неравенства (12) $\left[(m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2 \right]_{\max}$ для максимальной силы $F_{\text{ц, max}}$. Для расчета примем исходные параметры бытовой стиральной машины исходя из наиболее применяемых в реальности величин: загрузка машины $m_0 = 5\text{--}6$ кг (номинальная масса сухого белья), диаметр внутренней емкости (соответствует диаметру барабана стиральной машины без АБУ) $d_{\text{в}} = 0,47$ м, длина внутренней емкости (принимая равной длине барабана стиральной машины без АБУ) $l_{\text{в}} = 0,25$ м. Текущие значения массы отжимаемых текстильных изделий $m_{\text{б}}$ и эксцентриситет $r_{\text{е, б}}$, изменяющихся в течение процесса центробежного отжима, определяются в соответствии с методикой, приведенной в диссертации Фетисова И. В. [12]. Для этого примем частоту вращения барабана при установившемся процессе отжима $n_{\text{буст}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ($\omega_{\text{буст}} = 104,72 \text{ рад/с}$). Масса $m_{\text{в}}$ внутренней емкости (в машинах без АБУ – это масса барабана $m_{\text{б}}$) обычно находится в пределах $m_{\text{в}} = m_{\text{б}} = 1,0 \dots 2,0$ кг, примем $m_{\text{в}} = m_{\text{б}} = 1,5$ кг.

В результате расчетов получили:

- для $m_0 = 5$ кг: $\left[(m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2 \right]_{\max} = 220454,2 \text{ кг/м}$;
- для $m_0 = 6$ кг: $\left[(m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2 \right]_{\max} = 261255,2 \text{ кг/м}$.

В соответствии с условием (12) примем: для $m_0 = 5$ кг – $c_{\max} = 221000 \text{ кг/м}$; для $m_0 = 6$ кг – $c_{\max} = 262000 \text{ кг/м}$.

Используя полученные значения жесткости упругих элементов АБУ определили по формуле (11) величины перемещения Δl внутренней емкости в течение периода отжима. Графики зависимости $\Delta l = f(\tau)$, где времени отжима τ соответствует определенное значение частоты вращения барабана $\omega_{\text{б}}$, а значения перемещения Δl получены для условия выбора исходным параметром жесткости c , представлен на рис. 2.

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что при принятых значениях жесткости c упругих элементов АБУ максимальная неуравновешенная сила $F_{\text{ц, max}}$, возникающая при окончании разгона барабана в момент времени $\tau = 4,03$ с, приводит к значительным перемещениям внутренней емкости, которые не могут быть реализованы в реальных стиральных машинах. Таким образом, вариант, при котором задаваемым параметром является жесткость c упругих элементов АБУ, является нерациональным.

Рассмотрим вариант, при котором задаваемым параметром является максимальное перемещение внутренней емкости $\Delta l_{\max}$ при максимальной неуравновешенной силе $F_{\text{ц, max}}$ в соответствующий момент времени $\tau = 4,03$ с.

Укажем, что выбор значения $\Delta l_{\max}$ зависит от конструктивных параметров стиральной машины, а также от задач и приоритетов, устанавливаемых проектировщиками стиральных машин. В данной работе исходя из миними-

зации габаритных размеров стиральной машины и с учетом реализации функции уравнивания примем $\Delta l_{\max} = 0,04$ м.

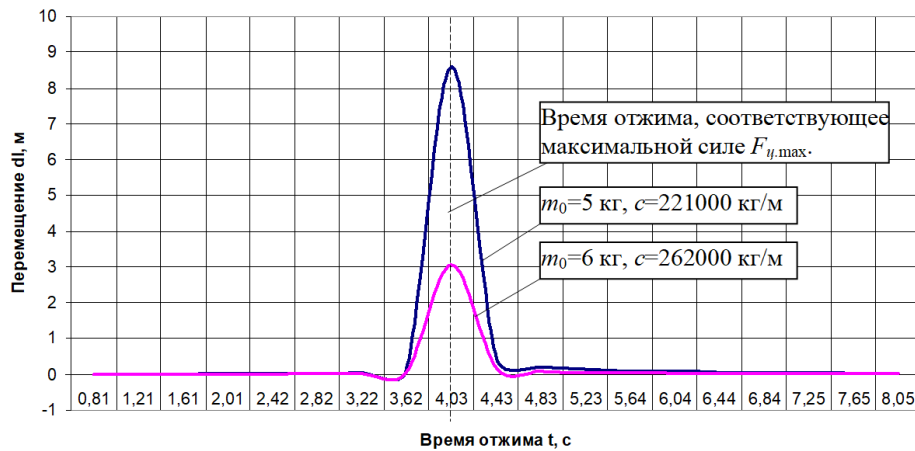


Рис. 2. Графики зависимости $\Delta l = f(\tau)$, полученные для условия выбора исходным параметром жесткости c

В результате расчетов получили: для $m_0 = 5$ кг – $c_{\max} = 337619,3$ кг/м; для $m_0 = 6$ кг – $c_{\max} = 318266,4$ кг/м.

В этом случае максимальную жесткость $c_{\max}$ определим, преобразовав формулу (11):

$$c_{\max} = \omega_B^2 \left(\frac{m_6 r_{e.6}}{\Delta l_{\max}} + m_6 + m_B \right). \quad (13)$$

Используя полученные значения жесткости упругих элементов АБУ, определили по формуле (11) величины перемещения Δl внутренней емкости в течение периода отжима. Графики зависимости $\Delta l = f(\tau)$, где времени отжима τ соответствует определенное значение частоты вращения барабана ω_B , а значения перемещения Δl получены для условия выбора исходным параметром перемещения Δl , представлены на рис. 3.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что перемещение Δl внутренней емкости не превышает 0,04 м, что соответствует заданному исходному параметру и может быть реализовано в существующих стиральных машинах. Таким образом, вариант, при котором задаваемым параметром является перемещение Δl внутренней емкости, является обоснованным и рациональным.

Анализируя графики на рис. 3, следует также отметить, что кривые состоят из двух ветвей, из которых характер поведения левой в соответствии с формулой (11) определяется в основном квадратичной зависимостью роста частоты вращения барабана ω_B , а также линейными зависимостями снижения массы отжимаемых текстильных изделий m_6 и изменения эксцентриситета $r_{e.6}$. Правая ветвь, также как и левая, имеет нелинейную зависимость, но определяется лишь снижением массы отжимаемых текстильных изделий m_6 и изменением эксцентриситета $r_{e.6}$ по линейным зависимостям при постоянной частоте $\omega_B = \text{const}$.

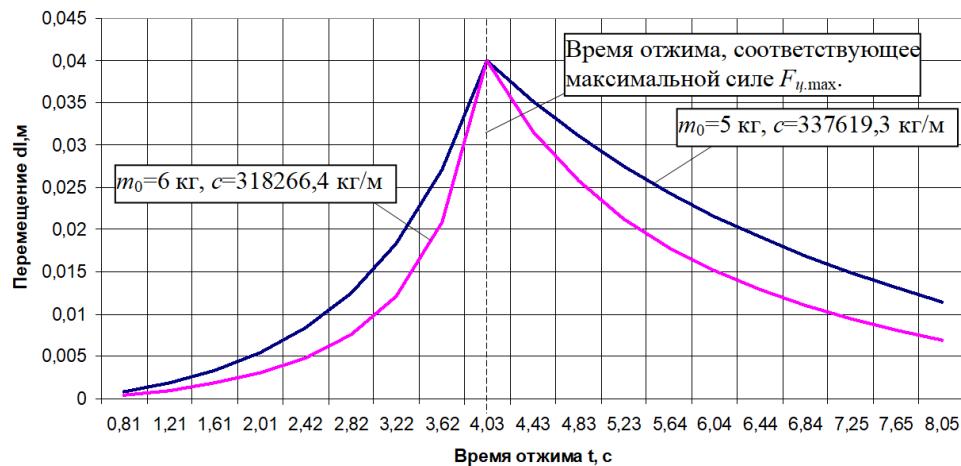


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta l = f(t)$, где времени отжима t соответствует определенное значение частоты вращения барабана ω_b , а значения перемещения Δl получены для условия выбора исходным параметром перемещения Δl

4. Исследование поведения неуравновешенной и уравнивающей сил в период процесса отжима

Исследуем поведение функций $F_{ц}$ и F_y используя, соответственно, зависимости (2) и (8), а также значения перемещения Δl внутренней емкости в период отжима.

На рис. 4 приведены графики центробежной $F_{ц}$ и уравнивающей F_y сил в период отжима при загрузке машины $m_0 = 5$ кг, на рис. 5 – при загрузке машины $m_0 = 6$ кг.

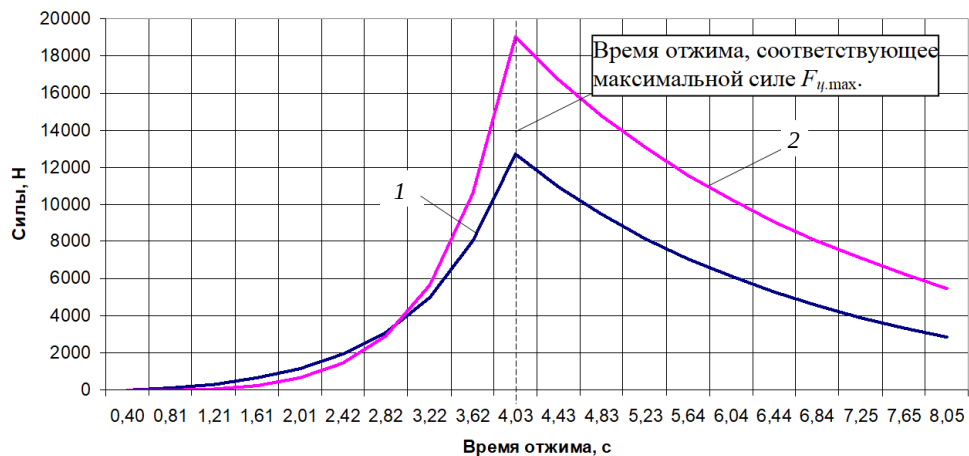


Рис. 4. Центробежная $F_{ц}$ (1) и уравнивающая F_y (2) силы в период отжима при загрузке машины $m_0 = 5$ кг

Качественный анализ графиков на рис. 4 и 5 указывает на то, что уравнивающая сила F_y имеет относительно незначительные отклонения от центробежной силы $F_{ц}$, причем на одном из участков периода отжима происходит совпадение значений сил.

Рассуждая о том, каким образом возможно обеспечить полное совпадение значений $F_{ц}$ и F_y на всем участке периода отжима, очевидно, следует обратить внимание на формулу F_y (8). Как видим, здесь переменными параметрами являются перемещение Δl и частота ω_B . Однако эти же переменные параметры входят и в формулу $F_{ц}$ (2). То есть изменение Δl и ω_B ведет не только к изменению уравнивающей силы F_y , но и неуравновешенной силы $F_{ц}$. Анализируя далее формулы (2) и (8), приходим к выводу, что единственным рациональным решением, обеспечивающим полное уравнивание системы, является изменение величин перемещения Δl , что ведет за собой соответствующее изменение жесткости упругих элементов c АБУ в период отжима. Отсюда следует вывод, что для обеспечения полного уравнивания, т.е. для обеспечения равенства сил $F_{ц} = F_y$ в период отжима (или во всем диапазоне частота вращения барабана ω_B), необходимо использование упругих элементов АБУ с переменной жесткостью $c \neq \text{const}$.

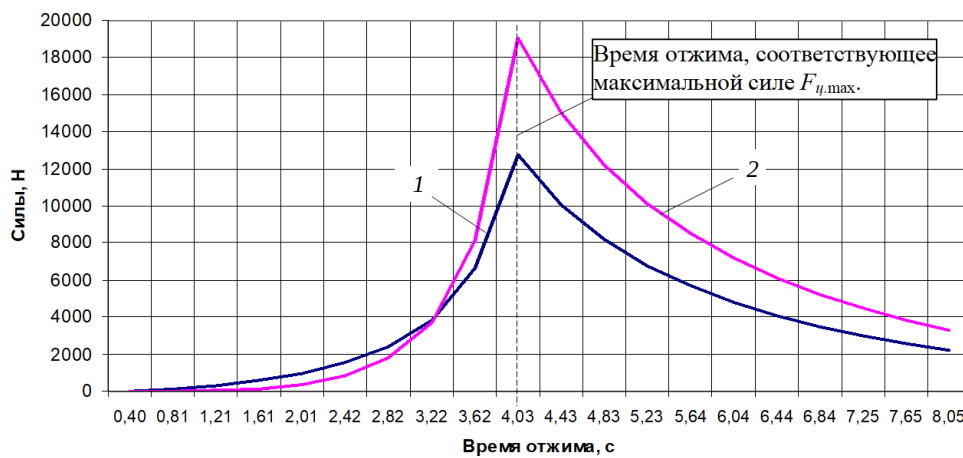


Рис. 5. Центробежная $F_{ц}$ (1) и уравнивающая F_y (2) силы в период отжима при загрузке машины $m_0 = 6$ кг

Для нахождения функции переменной жесткости c , обеспечивающей процесс уравнивания, предварительно определим соответствующее перемещение Δl внутренней емкости из условия равенства сил $F_{ц} = F_y$, описываемых формулами (2) и (8):

$$[m_0 r_{e.б} + (m_0 + m_B) \Delta l] \omega_B^2 = \left(\rho_{ж} \frac{\pi d_B^2}{4} l_{п} \right) \Delta l \cdot \omega_B^2, \quad (14)$$

откуда

$$\Delta l = \frac{m_0 r_{e.б}}{\left(\frac{\pi d_B^2}{4} \rho_{ж} l_{п} \right) - (m_0 + m_B)}. \quad (15)$$

Реализация данного перемещения позволяет обеспечить процесс полного уравнивания рассматриваемой системы в период отжима.

Далее для нахождения функции переменной жесткости c будем учитывать, что перемещение, определяемое по формуле (11), должно соответствовать перемещению, определяемому формулой (15):

$$\frac{m_{\text{б}} r_{\text{е.б}} \omega_{\text{б}}^2}{c - (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2} = \frac{m_{\text{б}} r_{\text{е.б}}}{\left(\frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} \rho_{\text{ж}} l_{\text{п}} \right) - (m_{\text{б}} + m_{\text{в}})}. \quad (16)$$

После преобразования формулы (16) получим

$$c = \left(\frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} \rho_{\text{ж}} l_{\text{п}} \right) \omega_{\text{б}}^2. \quad (17)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что жесткость c упругих элементов АБУ для обеспечения адекватного силового отклика системы на входное силовое воздействие должна определяться нелинейной степенной квадратичной зависимостью (параболой второго порядка) в период отжима (в интервале всех реализуемых частот вращения барабана).

Заключение

Таким образом, в данной работе были получены формулы для определения входного силового воздействия и силового отклика в исследуемой системе. Также были получены формулы и исследованы параметры, определяющие процесс формирования силовых факторов в системе АБУ рассматриваемого типа. Исследовано поведение неуравновешенной и уравнивающей сил в период отжима.

На основании результатов выполненной работы были сделаны выводы об условиях, обеспечивающих процесс уравнивания неуровновешенных масс текстильных изделий в стиральном барабане при центробежном отжиме:

1. Основным условием уравнивания является выполнение равенства неуровновешенной $F_{\text{ц}}$ и уравнивающей $F_{\text{у}}$ сил в период отжима (во всем диапазоне частот вращения барабана): $F_{\text{ц}}(\tau) = F_{\text{у}}(\tau)$.

2. Система упругих элементов АБУ будет обеспечивать перемещение внутренней емкости при силовом воздействии на нее неуровновешенной силы $F_{\text{ц}}$ и выполнять свои функции при выполнении условия: $c > (m_{\text{б}} + m_{\text{в}}) \omega_{\text{б}}^2$.

3. В качестве исходного задаваемого параметра при расчете силовых факторов АБУ следует выбирать величину перемещения внутренней емкости Δl .

4. При использовании упругих элементов АБУ с постоянной жесткостью происходит лишь частичное уравнивание системы.

5. Для полного уравнивания системы необходимо использовать упругие элементы АБУ с переменной характеристикой – квадратичной зависимостью.

Результаты работы предполагается использовать для дальнейших исследований характеристик упругих элементов АБУ и соответствующих конструктивных и режимных параметров стирального барабана с целью обеспе-

чения максимально возможного уравнивания неуравновешенных масс текстильных изделий, что позволит снизить динамические нагрузки и виброактивность стиральных машин при центробежном отжиме.

Библиографический список

1. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.
2. **Гусаров, А. А.** Автобалансирующие устройства прямого действия / А. А. Гусаров. – М. : Наука, 2002. – 120 с.
3. **Majewski, T.** Fluid automatic balancer for a washing machine / Tadeusz Majewski // *Memorias del XVI congreso internacional anual de la somim*. – Monterrey, Nuevo León, México, 2010.
4. **Пашков, Е. Н.** Динамика роторных систем с жидкостными автоматическими балансирующими устройствами : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Пашков Е. Н. – Томск, 2010. – 18 с.
5. **Urbiola-Soto, L.** Liquid self-balancing device effects on flexible rotor stability / Leonardo Urbiola-Soto, Marcelo Lopez-Parra // *Shock and Vibration*. Publisher: IOS Press. – Country : United States, 2013. – S. 109–121.
6. **Clerc, C.** An auto-balancer device for high spin-drying frequencies (LoWash Project) / Christian Clerca, Alexandre Carbonelli and Romain Augez // *VIBRATEC*, 28 chemin du Petit Bois, 69131 Ecully Cedex, France. MATEC Web of Conferences 20, 03001 (2015). – Ecully Cedex, France, 2015.
7. А.с. 1581795. СССР, МПК5. Машина для стирки и отжима белья. – № 4442163 ; заявл. 15.06.1988 ; опубл. 30.07.1990, Бюл. № 28. – 12 с.
8. Пат. 2469138 Российская Федерация. Стиральная машина барабанного типа. – № 2011128109/12 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. – 3 с.
9. Пат. 2516147 Российская Федерация. Стиральная машина барабанного типа. – № 2012141624/12 ; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. – 3 с.
10. Пат. 2555634 Российская Федерация. Автобалансирующее устройство стиральных машин барабанного типа. – № 2014106503/12 ; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 19. – 3 с.
11. **Лебедев, В. С.** Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания / В.С. Лебедев. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 336 с.
12. **Фетисов, И. В.** Исследование случайных воздействий на вибрационные характеристики стиральных машин барабанного типа при отжиме : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Фетисов И. В. – Шахты, 2011. – 199 с.

References

1. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik: v 6 t. T. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov* [Vibrations in the technique: reference book: in 6 volumes. Volume 6. Protection against vibration and impacts]. Ed. K. V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 456 p.
2. Gusarov A. A. *Avtobalansiruyushchie ustroystva pryamogo deystviya* [Direct acting autobalancing devices]. Moscow: Nauka, 2002, 120 p.
3. Majewski T. *Memorias del XVI congreso internacional anual de la somim* [Memories of the XVI Annual International Congress]. Monterrey, Nuevo León, México, 2010.
4. Pashkov E. N. *Dinamika rotornykh sistem s zhidkostnymi avtomaticheskimi balansiruyushchimi ustroystvami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 01.02.06* [Dynamics of rotary systems with automatic liquid balancing devices: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Tomsk, 2010, 18 p.

5. Urbiola-Soto L., Lopez-Parra M. *Shock and Vibration*. Publisher: IOS Press. Country: United States, 2013, pp. 109–121.
6. Clerc C., Carbonelli A., Augez R. *VIBRATEC, 28 chemin du Petit Bois, 69131 Ecully Cedex, France. MATEC Web of Conferences 20, 03001 (2015)*. Ecully Cedex, France, 2015.
7. A.s. 1581795. SSSR, MPK5. *Mashina dlya stirki i otzhima bel'ya* [Patent 1581795 USSR, MPK5. Machine for washing and spinning linen]. № 4442163; appl. 15.06.1988; publ. 30.07.1990, Bul. № 28, 12 p.
8. Pat. 2469138 Rossiyskaya Federatsiya. *Stiral'naya mashina barabannogo tipa* [Patent 2469138 Russian Federation. Drum type washing machine]. № 2011128109/12; publ. 10.12.2012, Bul. № 34. – 3 s.
9. Pat. 2516147 Rossiyskaya Federatsiya. *Stiral'naya mashina barabannogo tipa* [Patent 2516147 Russian Federation. Drum type washing machine]. № 2012141624/12; publ. 20.05.2014, Bul. № 14. 3 p.
10. Pat. 2555634 Rossiyskaya Federatsiya. *Avtobalansiruyushchee ustroystvo stiral'nykh mashin barabannogo tipa* [Patent 2555634 Russia Federation. Auto-balance device of drum-type washing machines]. № 2014106503/12; publ. 20.02.2014, Bul. № 19, 3 p.
11. Lebedev V. S. *Tekhnologicheskie protsessy mashin i apparatov v proizvodstvakh bytovogo obsluzhivaniya* [Technological processes of machines and devices in the production of household services]. Moscow: Legprombytizdat, 1991, 336 p.
12. Fetisov I. V. *Issledovanie sluchaynykh vozdeystviy na vibratsionnye kharakteristiki stiral'nykh mashin barabannogo tipa pri otzhime: dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.13* [The study of random effects on the vibration characteristics of drum-type washing machines during spinning: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Shakhty, 2011, 199 p.

Алехин Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технических систем ЖКХ
и сферы услуг, Донской
государственный технический
университет, Институт сферы
обслуживания и предпринимательства
(филиал) в г. Шахты (Россия, Ростовская
область, г. Шахты, ул. Шевченко, 147)

E-mail: alex_cn@mail.ru

Алехин Алексей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технических систем ЖКХ
и сферы услуг, Донской
государственный технический
университет, Институт сферы
обслуживания и предпринимательства
(филиал) в г. Шахты (Россия, Ростовская
область, г. Шахты, ул. Шевченко, 147)

E-mail: alekalh@yandex.ru

Alekhin Sergey Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of technical
systems housing and public utilities
and services, Don State Technical
University, Institute of Service
and Business (branch) DSTU in Shakhty
(147 Shevchenko street, Shakhty, Rostov
region, Russia)

Alekhin Aleksey Sergeevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of technical
systems housing and public utilities
and services, Don State Technical
University, Institute of Service and Business
(branch) DSTU in Shakhty
(147 Shevchenko street, Shakhty,
Rostov region, Russia)

Петросов Сергей Петрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технических
систем ЖКХ и сферы услуг, Донской
государственный технический
университет, Институт сферы
обслуживания и предпринимательства
(филиал) в г. Шахты (Россия, Ростовская
область, г. Шахты, ул. Шевченко, 147)

E-mail: Petrosov217@rambler.ru

Petrosov Sergey Petrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of technical
systems housing and public utilities
and services, Don State Technical
University, Institute of Service
and Business (branch) DSTU in Shakhty
(147 Shevchenko street, Shakhty,
Rostov region, Russia)

Никишин Владислав Викторович

студент, Донской государственный
технический университет,
Институт сферы обслуживания
и предпринимательства (филиал)
в г. Шахты (Россия, Ростовская область,
г. Шахты, ул. Шевченко, 147)

E-mail: ni.nikishin@yandex.ru

Nikishin Vladislav Viktorovich

Student, Don State Technical University,
Institute of Service and Business (branch)
DSTU in Shakhty (147 Shevchenko street,
Shakhty, Rostov region, Russia)

УДК 621.8

Алехин, С. Н.

Исследование условий процесса уравнивания в жидкостном автобалансирующем устройстве стиральных машин / С. Н. Алехин, А. С. Алехин, С. П. Петросов, В. В. Никишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 140–153. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-13.

МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ДИСКРЕТНО-ТКАНЕВЫХ ПРЕГРАД ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Появление в настоящее время широкой номенклатуры новых высокопрочных синтетических волокон создает предпосылки для качественного скачка в развитии средств индивидуальной защиты, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони. Компьютерное моделирование процессов функционирования позволяет сократить продолжительность процесса проектирования и обеспечить более высокую эффективность средств индивидуальной защиты. Целью работы является определение иерархической структуры моделей материалов, предназначенной для описания сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых элементов средств индивидуальной защиты при ударном нагружении.

Материалы и методы. В качестве исследуемых выбраны материалы дискретно-тканевых элементов средств индивидуальной защиты, выпускаемых отечественной промышленностью. При изучении влияния структуры тканей на их сопротивление деформированию и разрушению использовался теоретико-экспериментальный метод, основанный на использовании математических моделей материалов, учитывающих тонкое строение композиционных материалов, тканей и нитей.

Результаты. Приведено краткое описание иерархической структуры математических моделей материалов дискретно-тканевых элементов средств индивидуальной защиты, на примерах показана последовательность определения параметров этих моделей, проведено сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса функционирования бронешлема.

Выводы. Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов показало, что предложенные математические модели материалов могут быть использованы при проектировании средств индивидуальной защиты, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты, дискретно-тканевая броня, нити, ткани, строение и структура, математические модели материалов, параметры моделей материалов, компьютерное моделирование, ударное нагружение.

А. И. Bogomolov, А. Yu. Muizemnek, Е. D. Kartashova

MODELS OF RESISTANCE TO DEFORMATION AND DESTRUCTION OF DISCRETE-TISSUE OVERCOMES UNDER SHOCK LOADING

© 2018 Богомолов А. И., Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Relevance and goals. The appearance at the present time of a wide range of new high-strength synthetic fibers creates the prerequisites for a qualitative leap in the development of personal protective equipment with elements of discrete-fabric armor. Computer modeling of the functioning processes allows to shorten the duration of the design process and ensure a higher efficiency of personal protective equipment. The aim of the work is to determine the hierarchical structure of material models intended to describe the resistance to deformation and destruction of discrete-fabric elements of personal protective equipment under shock loading..

Materials and methods. As the researched materials of discrete-fabric elements of the means of individual protection produced by the domestic industry were chosen. When studying the influence of the structure of tissues on their resistance to deformation and fracture, a theoretical-experimental method was used, based on the use of mathematical models of materials that take into account the fine structure of composite materials, fabrics and threads.

Results. A brief description of the hierarchical structure of mathematical models of materials of discrete-tissue elements of personal protective equipment is given, examples are a sequence of determining the parameters of these models, a comparison of the results of computer simulation and experimental studies of the process of functioning of the armor.

Conclusions. Comparison of the results of computer simulation with the results of experiments showed that the proposed mathematical models of materials can be used in the design of personal protective equipment with elements of discrete-fabric armor.

Keywords: means of individual protection, discrete-fabric armor, threads, fabrics, structure and structure, mathematical models of materials, parameters of material models, computer simulation, impact loading.

Введение

Достаточно широкий ассортимент выпускаемых отечественной промышленностью высокопрочных синтетических волокон, нитей и тканей на их основе создает предпосылки для качественного скачка в развитии средств индивидуальной защиты, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони. Элементы средств индивидуальной защиты из дискретно-тканевой брони обычно состоят из наружной и внутренней оболочек, изготовленных из полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ) и свободно лежащих между ними слоев ткани. Наружная и внутренняя оболочки определяют форму элемента, а свободно лежащие тканевые слои поглощают кинетическую энергию баллистического элемента. Компьютерное моделирование процессов функционирования позволяет сократить продолжительность процесса проектирования и обеспечить более высокую эффективность средств индивидуальной защиты.

Современный этап развития синтетических волокон, нитей и тканей, а также изделий из них характеризуется накоплением экспериментальных данных об их поведении [1–3]. Интенсивно изучаются закономерности влияния тонкого строения нитей и тканей на их сопротивление деформированию и разрушению как при нахождении тканей в виде свободно лежащих слоев, так и в составе композита. Особый интерес представляет изучение поведения тканей из арамидных, углеродных и стеклянных волокон, так как они чаще

применяются в современных средствах индивидуальной защиты, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони. Арамидные ткани используются как в качестве свободно лежащих тканевых слоев, так и в составе ПСКМ. Ткани из стекло- и углеволокна обычно используются в составе ПСКМ.

Механическое поведение тканей из синтетических волокон отличается анизотропией механических свойств и сложностью процессов деформирования и разрушения. Для адекватного описания процессов сопротивления деформированию и разрушению тканей в условиях ударного нагружения необходимо учитывать геометрические и физико-механические характеристики волокон, характеристики структуры свободно лежащих и входящих в состав ПСКМ тканей. При изучении механического поведения ПСКМ представляется оправданным использование теоретико-экспериментального подхода, основанного на математических моделях материалов, образующих иерархическую структуру. Идентификация параметров этих моделей осуществлена на основе полученных в ходе исследования экспериментальных данных. При этом для описания сопротивления деформированию и разрушению тканей из синтетических нитей были использованы модели тканых материалов, учитывающих их тонкое строение.

Таким образом, целью работы являлось определение иерархической структуры моделей материалов, используемых для описания сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых элементов средств индивидуальной защиты, идентификация их параметров.

В дискретно-тканевой броне можно выделить три уровня структуры: микро-, мезо- и макроуровень. Микроуровень включает элементы структуры, имеющие характерные размеры от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров, мезауровень – до нескольких сотен микрометров, макроуровень – элементы, имеющие больший размер. Например, для конструкций современных бронешлемов, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони, микроуровень включает элементы микроструктуры, имеющие размеры, сопоставимые с диаметром элементарных волокон (феламентов), из которых изготовлены нити как свободно лежащих слоев ткани, так и входящие в состав ПСКМ внешней и внутренней оболочек. Мезауровень включает элементы с размерами, сопоставимыми с характерными размерами репрезентативных ячеек тканей, макроуровень – с размерами слоев свободно лежащей ткани или с размерами внешней и внутренней оболочек.

Иерархия моделей сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевой брони, в общем, соответствует этим структурным уровням.

1. Модели сопротивления деформированию и разрушению волокон и нитей

Модели сопротивления деформированию и разрушению элементарных волокон в иерархии моделей образуют низший уровень. Учитывая, что достаточно широкая номенклатура композиционных материалов, тканей и нитей может быть создана на основе элементарных волокон одной марки, изучению физико-механических свойств элементарных волокон уделяется большое внимание как на предприятиях-производителях, так и в сторонних научно-исследовательских организациях. Например, в работе [1] для волокна Русар (A265) приведены значения: объемной плотности, среднего диаметра волокон

на, среднего предельного напряжения растяжения, средней предельной деформации растяжения, среднего модуля упругости, средней работы разрушения при растяжении. В работе [1] также приведены значения этих характеристик при растяжении со скоростью деформации $1,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Сопоставление значений характеристики сопротивления деформированию свидетельствует об увеличении среднего предельного напряжения растяжения на 21 %, средней предельной деформации растяжения на 3 %, среднего модуля упругости на 17 %, средней работы разрушения при растяжении на 25 %.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что сопротивление деформированию и разрушению материала элементарных волокон зависит от скорости деформирования. Поэтому описание поведения элементарных волокон с помощью изотропной модели упругости и одного силового или деформационного критерия разрушения может рассматриваться лишь как первое приближение.

Сопротивление деформированию нити может быть описано реологической моделью, включающей последовательно соединенные элемент Максвелла без демпфера и элемент Кельвина – Фойхта. Схема реологической модели нити приведена в работах [4–6].

Соответствующее дифференциальное уравнение сопротивления деформированию нити, связывающее напряжения σ , деформации ϵ и их скорости, может быть записано в следующем виде:

$$(K_a + K_b)\dot{\sigma} + \mu_b \dot{\sigma} = K_a K_b \dot{\epsilon} + \mu_b K_a \dot{\epsilon}, \quad (1)$$

где K_a, K_b, μ_b – параметры модели.

Параметры K_a и K_b представляют собой коэффициенты жесткости пружин элементов Максвелла и Кельвина – Фойхта соответственно. Параметр μ_b является коэффициентом вязкости элемента Кельвина – Фойхта.

Входными параметрами для данной реологической модели являются статический модуль Юнга материала нити E_1 , коэффициент жесткости пружины элемента Максвелла K_a и коэффициент вязкости элемента Кельвина – Фойхта μ_b . Коэффициент жесткости пружины элемента Кельвина – Фойхта K_b выражается через параметры E_1 и K_a .

Характеристиками прочности нити являются статическая предельная деформация материала $\epsilon_{\max}$ и предельная деформация пружины элемента Максвелла $\epsilon_{a \max}$.

Эта модель может быть использована для описания сопротивления деформированию и разрушению как нитей свободно лежащих слоев тканей, так и тканей, входящих в состав ПСКМ. Значения параметров модели для трех тканей, используемых в конструкциях, работающих в условиях ударного нагружения, приведены в работе [7].

2. Модели сопротивления деформированию и разрушению связующего

Наиболее существенными отличительными чертами механического поведения многих связующих современных ПСКМ являются возникновение в процессе нагружения пластических деформаций, наличие упрочнения мате-

риала на начальной стадии упругопластического деформирования и разупрочнения на последующей стадии. Стадии упрочнения материала на начальной стадии упругопластического деформирования и последующего разупрочнения могут быть описаны на основе допущения о накоплении в материале поврежденности.

Для описания сопротивления деформированию и разрушению связующего может быть выбрана упругопластическая модель с экспоненциальным упрочнением, учитывающая накопление поврежденности по Лемайтре – Шабошу.

Эта модель основывается на аддитивном разложении тензора деформаций материала $\boldsymbol{\varepsilon}$ на упругую $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ и пластическую $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ составляющие:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p. \quad (2)$$

Связь тензора напряжения Коши $\boldsymbol{\sigma}$ с тензором упругой деформации $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ определяется выражением

$$\boldsymbol{\sigma} = \tilde{\mathbf{N}} : \boldsymbol{\varepsilon}^e, \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{N}}$ – тензор четвертого ранга, компоненты которого зависят от модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν .

Тензор пластических деформаций вычисляется следующим образом:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_{eq} \frac{\partial f(\boldsymbol{\sigma}, R)}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \quad (4)$$

где $f(\boldsymbol{\sigma}, R) = \sigma_{vm} - \sigma_Y - R(\varepsilon_{eq})$ – функция текучести; $\dot{\varepsilon}_{eq}$ – скорость накопления пластической деформации $\dot{\varepsilon}_{eq} = \frac{2}{3} \sqrt{J_2(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p)}$; $J_2(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) = \frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ – скорость второго инварианта тензора пластических деформаций; $R(\varepsilon_{eq})$ – функция упрочнения; σ_Y – предел текучести материала.

При экспоненциальном законе упрочнения имеем

$$R(\varepsilon_{eq}) = R_\infty [1 - \exp(-m \varepsilon_{eq})], \quad (5)$$

где R_∞, m – модуль упрочнения и экспоненциальный показатель соответственно.

Считается, что пластические деформации возникают, если приведенные по Мизесу напряжения $\sigma_{vm} = \sqrt{J_2(\boldsymbol{\sigma})}$ превышают предел текучести материала $\sigma_{vm} > \sigma_Y$ ($J_2(\boldsymbol{\sigma}) = \left(\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}\right)$ – второй инвариант девиатора тензора напряжений Коши). При выполнении условия $\sigma_{vm} \leq \sigma_Y$ поведение материала является чисто упругим.

Предел текучести связан с величиной накопленной пластической деформации выражением

$$\sigma_Y(\varepsilon_{eq}) = \sigma_Y + R(\varepsilon_{eq}). \quad (6)$$

Накопленная пластическая деформация определяется путем интегрирования скорости накопления пластической деформации по времени:

$$\varepsilon_{eq} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{eq} dt. \quad (7)$$

Скорость скалярной меры накопленной поврежденности D определяется выражением

$$\dot{D} = \frac{\sigma_Y}{S_0} \left[\frac{Y(\bar{\sigma})}{\sigma_Y} \right]^n \dot{\varepsilon}_{eq}, \quad (8)$$

где S_0 – параметр скорости накопления поврежденности;

$$Y(\bar{\sigma}) = \frac{1}{2E_0} \left[\frac{\sigma_{vm}}{1-D} \right]^2 R_v; \quad R_v = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right]^2 - \text{функции};$$

$\sigma_f = -\frac{1}{3}Tr(\sigma)$ – гидростатическое давление; n – константа Лемайтре – Шампона.

С учетом накопленной поврежденности напряжения в материале вычисляются по зависимости

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-D)}, \quad (9)$$

где $\sigma, \bar{\sigma}$ – тензор напряжений в неповрежденном и поврежденном материалах соответственно.

Особенности подготовки исходных данных для построения микромеханических моделей слоистых пластиков приведены в работе [8].

3. Модели тканых материалов

Наиболее существенными отличительными чертами механического поведения тканей свободно лежащих слоев являются:

- анизотропия механических свойств;
- нелинейность сопротивления деформированию, которая при сдвиге проявляется уже на начальной стадии деформирования. При дальнейшем деформировании возможно разупрочнение материала, вызванное прогрессирующим разрушением материала. Стадия разупрочнения может характеризоваться достаточно продолжительным и относительно стабильным сопротивлением деформированию. Стадия разупрочнения завершается разрушением материала, которому предшествует резкое падение сопротивления деформированию;
- накопление поврежденности в материале, которое в основном и определяет сопротивление деформированию на стадии разупрочнения;

– разрушение, которое может рассматриваться как процесс образования и увеличения количества дефектов в материале, приводящее в итоге к потере его целостности;

- зависимость механических свойств от скорости деформации;
- различие в сопротивлении деформированию при растяжении и сжатии.

Возможность и целесообразность использования для описания той или иной модели материала должны рассматриваться с учетом возможности модели описывать перечисленные свойства тканей свободно лежащих слоев.

Для моделирования тканых материалов свободно лежащих слоев изделий различного назначения широкое распространение получили следующие модели тканей:

- модель ткани для подушек безопасности (тип 34);
- модель слоя композиционного материала, состоящего из однонаправленных нитей или ткани, а также всего композиционного материала (тип 58);
- модель анизотропных вязкоупругих тканых материалов (тип 234);
- модель сухих тканых материалов (тип 235).

Достаточно подробное описание этих моделей содержится в изданиях [4, 5], анализ описательных возможностей моделей содержится в работе [7].

Модель материала типа 34 была разработана и продолжает совершенствоваться для моделирования процессов функционирования подушек безопасности в краш-тестах. Она не описывает зависимость механических свойств от скорости деформации, разрушение и процесс накопления поврежденности. Поэтому возможности использования этой модели для моделирования тканых материалов свободно лежащих слоев ограничены.

Модель материала типа 58 описывает процессы накопления поврежденности и разрушения и учитывает различие в сопротивлении деформированию при растяжении и сжатии. Недостатком этой модели является то, что она не учитывает зависимость механических свойств от скорости деформаций.

Модель материала типа 234 учитывает анизотропию механических свойств, зависимость механических свойств от скорости деформации, разрушение и различие в сопротивлении деформированию при растяжении и сжатии. Недостатком этой модели является то, что она не учитывает накопление поврежденности.

Модель основывается на представлении репрезентативной ячейки в виде шарнирно-стержневого механизма, состоящего из четырех стержней, соединенных четырьмя шарнирами. В исходном состоянии стержни имеют возможность поворачиваться относительно друг друга. После достижения предельного угла поворота возникает внутренний контакт между стержнями механизма и шарнирно-стержневой механизм запирается. Для продолжения сдвига стержней относительно друг друга требуется значительно большее усилие сдвига. При вычислении предельного угла сдвига используются такие параметры репрезентативной ячейки, как шаг и ширина нитей. Для вычисления сопротивления нитей деформированию используется дифференциальное уравнение вязкоупругости (1). При вычислении напряжений на боковых гранях репрезентативной ячейки используются такие ее параметры, как толщина ткани и площадь сечения нитей. В результате модель позволяет учесть влияние на сопротивление деформированию ткани:

- изменения ориентации нитей ткани при сдвиге, в том числе блокировка нитей при пакетировании ткани;

- стеснение нитей при сдвиге;
- выпрямление нитей при их натяжении;
- взаимодействие нитей при их контакте.

Модель материала типа 235 учитывает анизотропию механических свойств, зависимость механических свойств от скорости деформации, разрушение и различие в сопротивлении деформированию при растяжении и сжатии. Недостатком этой модели является то, что она не учитывает накопление поврежденности.

Эта модель, как и модель типа 234, основывается на представлении структуры репрезентативной ячейки материала. Направления нитей в репрезентативной ячейке определяются углами волнистости для нити основы и утка и углом блокирования. Начальные значения этих углов являются параметрами модели. В отличие от модели типа 234, в ней используется процедура гомогенизации, обычно используемая при вычислении эффективных характеристик композиционных материалов. Модель улучшена путем введения коэффициента изменения модуля сдвига при действии шарнирного механизма при сдвиге.

В начальном положении материал имеет малое сопротивление сдвигу, и поэтому коэффициент уменьшения модуля сдвига имеет малое значение. При пакетировании поведение ткани становится похожим на поведение упругой среды и значение коэффициента изменения модуля сдвига становится равным единице. Угол блокирования нитей вычисляется так же, как и в модели типа 234. Для предотвращения высокочастотных осцилляций при переходе от свободного состояния нитей к компактированному состоянию ткани задается интервал углов блокирования, на котором коэффициент уменьшения модуля сдвига линейно возрастает. Влияние скорости деформации на сопротивление деформированию учитывается добавлением к нормальным напряжениям и напряжениям сдвига слагаемых $v_E \dot{\epsilon}_{11}$ (22) и $v_G \dot{\epsilon}_{12}$ соответственно.

Следует заметить, что модели материалов типа 234 и 235 включают деформационный критерий разрушения, а модель типа 235 – один силовой или один деформационный критерий разрушения. Таким образом, модели материалов типа 234 и 235 в большей степени учитывают существенные отличительные черты механического поведения тканей свободно лежащих слоев и поэтому являются предпочтительными для использования.

4. Модели полимерных слоистых композиционных материалов

Модель полимерного слоистого композиционного материала включает модели компонентов (армирующего и связующего) и модель межслойного разрушения. Для описания поведения компонентов полимерных слоистых композиционных материалов могут быть выбраны следующие модели [8]:

- изотропная, трансверсально изотропная, ортотропная, анизотропная модели линейно упругого тела;
- упругопластические модели со степенным, экспоненциальным и комбинированным упрочнением;
- упругопластические модели, учитывающие накопление поврежденности по Лемайтре – Шабошу;
- модель Леонова.

Для описания разрушения композиционного материала могут быть использованы следующие модели:

- модели предельных значений напряжений и деформаций;
- двумерные или трехмерные модели Цая – Хилла, основанные на напряжениях и деформациях;
- трансверсально изотропные или анизотропные трехмерные модели Цая – Хилла, основанные на напряжениях и деформациях;
- двухмерная модель Аззи – Цая;
- двухмерные, трансверсально изотропные или анизотропные трехмерные модели Цая – Ву, основанные на напряжениях и деформациях;
- двухмерная модель Хашина – Ротема;
- двухмерные или трехмерные модели Хашина.

Выбор моделей сопротивления деформированию и разрушению осуществляется на основе результатов экспериментальных исследований и представляет собой итерационный процесс.

5. Идентификация параметров моделей элементов дискретно-тканевой брони

Идентификация параметров моделей элементов дискретно-тканевой брони проводилась на основе результатов экспериментальных исследований ткани из синтетических волокон, представленных в работах [3, 7, 8]. Данным исследованиям предшествовали:

- определение и статистический анализ геометрических параметров репрезентативных ячеек;
- определение пористости и удельной массы исследуемых тканей и нитей;
- лабораторные испытания исследуемых тканей на растяжение.

Расчет пористости тканей осуществлялся по плотности нитей и тканей и геометрическим параметрам репрезентативных ячеек. Исходными данными для расчета пористости являлись:

- плотность элементарных синтетических волокон;
- удельная масса ткани;
- экспериментально определенная толщина ткани;
- измеренные геометрические параметры репрезентативных ячеек.

Лабораторные испытания тканей на растяжение были проведены на универсальной испытательной машине МИ-40КУ. При проведении испытаний использовались стандартные плоские образцы, толщина образцов соответствовала толщине композитной пластины. Образцы вырезались из пластин вдоль направления нитей основы, а также под углом 45° и 90°.

Анализ результатов лабораторных испытаний полимерных слоистых композиционных материалов и их компонентов позволил в качестве модели армирующего компонента выбрать модель изотропного упругого тела, а в качестве модели связующего компонента – упругопластическую модель с экспоненциальным упрочнением, учитывающую накопление поврежденности по Лемайтре – Шабошу.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить параметры моделей материалов типа 234 и 235 для тканей из синтетических волокон, используемых в конструкции бронешлема 6Б7-М1. Определенные значения параметров моделей приведены в работе [7].

Результаты лабораторных испытаний слоистых полимерных композиционных материалов, используемых в конструкции бронешлема, позволили идентифицировать параметры модели материала типа 58. Для определения эффективных упругих модулей нитей, тканей и композиционных материалов внутреннего и внешнего слоев оболочки использовался метод Мори – Танако [9]. При выполнении процедуры гомогенизации использовалась показанная на рис. 1, *a* геометрическая модель репрезентативной ячейки.

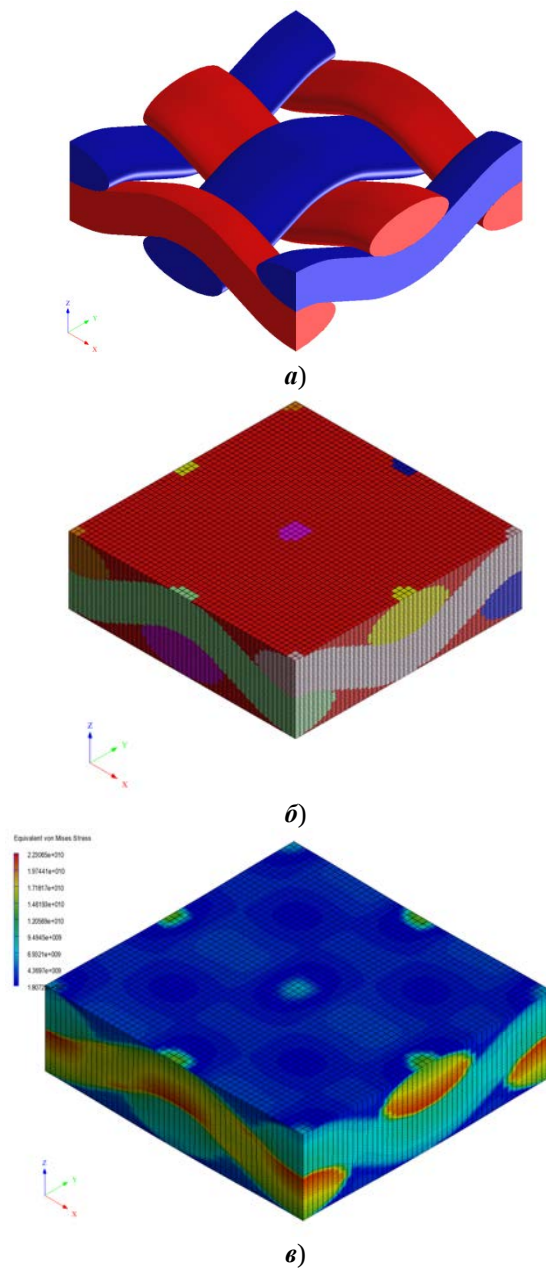
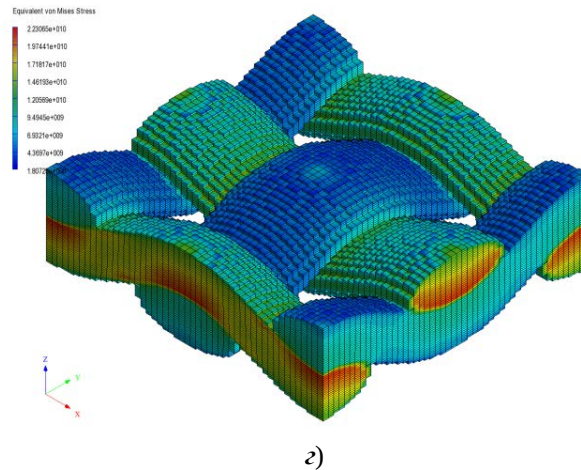


Рис. 1. Геометрическая модель репрезентативной ячейки (без матрицы) (*a*); *б* – конечно-элементная (*б*); *в, г* – распределения приведенных по Мизесу напряжений в репрезентативной ячейке (*в*) и в ткани (*г*)



з)

Рис. 1. Окончание

Используемая при расчете напряженно-деформированного состояния репрезентативной ячейки конечно-элементная сетка показана на рис. 1,б, полученные распределения приведенных по Мизесу напряжений в репрезентативной ячейке и в ткани – на рис. 1,в,г. Полученные значения упругих модулей арамидных нитей и инженерные константы полимерных слоистых композитов, используемых в конструкциях бронешлема, представлены в работе [10].

5. Результаты компьютерного моделирования деформирования и разрушения бронешлема 6Б7-1М при ударном нагружении

При компьютерном моделировании процесса баллистического взаимодействия 9,0-мм пули патрона 57-Н-181С пистолета ПМ с бронешлемом 6Б7-1М была использована компьютерная модель, включающая модели материалов типа 58 и 234 [11]. Компьютерная модель имела следующие характеристики: количество элементов – 978234; количество узлов – 994361; количество частей – 33; типы моделей материалов – 1, 10, 58, 234; средний размер конечных элементов – 0,5 мм.

Компьютерное моделирование позволило исследовать процессы сопротивления деформированию и разрушению бронешлема при различных скоростях и углах соударения.

Количественное и качественное сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами экспериментов показало их удовлетворительную согласованность [9]. Так, на рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования нарастания выпучины при выстреле из пистолета ПМ в боковую проекцию бронешлема со скоростью 304 м/с (шлем 2, расчет). Результаты расчета высоты нарастания выпучины значительно превышают результаты экспериментального тестирования на начальном участке формирования выпучины, но уже после истечения 0,3 мс величина относительной ошибки находится в интервале 20–30 %.

Сопоставление скоростей нарастания выпучины показало, что полученные в результате компьютерного моделирования скорости на начальном

участке формирования выпучины существенно превосходят экспериментально определенные скорости, но уже после истечения 0,2 мс величина относительной ошибки находится в интервале 10–20 %.

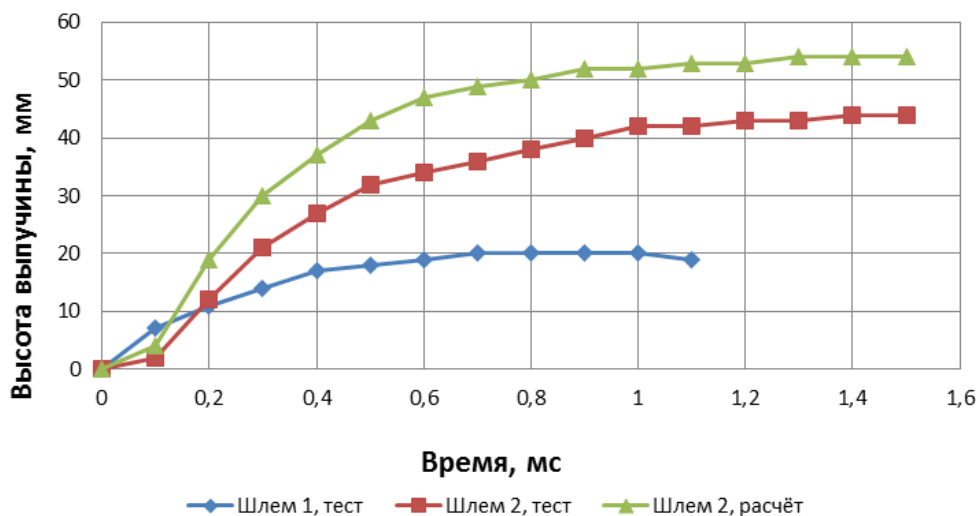


Рис. 2. Нарастание высоты выпучины (амплитуды заградного выступа) шлема во времени

Заключение

В работе представлена иерархическая структура моделей сопротивления деформированию и разрушению элементов дискретно-тканевой брони.

На основе результатов экспериментальных исследований структуры и механических свойств были идентифицированы параметры выбранных моделей.

Иерархическая структура моделей сопротивления деформированию и разрушению элементов дискретно-тканевой брони была использована при разработке компьютерной модели процесса баллистического взаимодействия 9,0-мм пули патрона 57-Н-181С пистолета ПМ с бронешлемом 6Б7-1М.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования баллистического взаимодействия 9,0-мм пули патрона 57-Н-181С пистолета ПМ с бронешлемом 6Б7-1М с результатами экспериментов показало, что модели сопротивления деформированию и разрушению элементов дискретно-тканевой брони, образующие иерархическую структуру, могут быть использованы и при проектировании изделий, имеющих элементы из дискретно-тканевой брони.

Библиографический список

1. Харченко, Е. Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 1. Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами / Е. Ф. Харченко, А. Ф. Ермоленко. – М., 2013. – 295 с.
2. Харченко, Е. Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 2. Современные защитные структуры и средства индивидуальной защиты / Е. Ф. Харченко. – М., 2014. – 295 с.

3. Исследование влияния микроструктуры полимерных композитов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин / А. И. Богомолов, В. М. Голощапов, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4. – С. 158–176.
4. **Hallquist, J. O.** LS-DYNA Theoretical Manual / J. O. Hallquist // Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA.
5. LS-DYNA. Keyword User's Manual Volume II. August 2012 Version 971 R6.1.0. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA.
6. **Tabiei, A.** Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation / Ala Tabiei, Ivelin Ivanov // 7-th International LS-DYNA Users Conference. – Grenoble, France, 2016. – P. 8–25.
7. **Муйземнек, А. Ю.** Модели сопротивления деформированию и разрушения тканей из арамидных нитей при ударном нагружении / А. Ю. Муйземнек, В. Я. Савицкий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3. – С. 168–178.
8. **Муйземнек, А. Ю.** Особенности подготовки исходных данных для построения микромеханических моделей слоистых пластиков / А. Ю. Муйземнек, В. Я. Савицкий, С. А. Нестеров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 1. – С. 152–162.
9. **Mori, T.** Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions / T. Mori, K. Tanaka // Acta Metallurgica. – 1973. – Vol. 21, № 5. – P. 571–574.
10. **Муйземнек А. Ю.** Исследование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек с двоякой положительной кривизной / А. Ю. Муйземнек // Вестник Пензенского государственного университета. – 2016. – № 2. – С. 100–116.
11. **Жуков И. Е.** Компьютерное моделирование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек бронешлема при высокоскоростном ударе / И. Е. Жуков, А. В. Миляев, А. Ю. Муйземнек, А. А. Котосов // Актуальные проблемы защиты и безопасности : сб. тр. XX Всерос. науч.-практ. конф. – СПб., 2017. – С. 143–148.

References

1. Kharchenko E. F., Ermolenko A. F. *Kompozitnye, tekstil'nye i kombinirovannye brone-materialy. T. 1. Mekhanizmy vzaimodeystviya s ballisticheskimi porazhayushchimi elementami* [Composite, textile and combined armor materials. Volume 1. Interaction mechanisms with ballistic striking elements.]. Moscow, 2013, 295 p.
2. Kharchenko E. F. *Kompozitnye, tekstil'nye i kombinirovannye bronematerialy. T. 2. Sovremennye zashchitnye struktury i sredstva individual'noy zashchity* [Composite, textile and combined armor materials. Volume 2. Modern security and even structures and personal protective equipment.]. Moscow, 2014, 295 p.
3. Bogomolov A. I., Goloshchapov V. M., Savitskiy V. Ya., Muiyzemnek A. Yu., Zinov'ev R. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 4, pp. 158–176.
4. Hallquist J. O. *Livermore Soft-ware Technology Corporation*. Livermore, CA.
5. *LS-DYNA. Keyword User's Manual Volume II. August 2012 Version 971 R6.1.0. Livermore Software Technology Corporation*. Livermore, CA.
6. Tabiei A., Ivanov I. *7-th International LS-DYNA Users Conference*. Grenoble, France, 2016, pp. 8–25.

7. Muzyemnek A. Yu., Savitskiy V. Ya. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]. 2016, no. 3, pp. 168–178.
8. Muzyemnek A. Yu., Savitskiy V. Ya., Nesterov S. A. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]. 2015, no. 1, pp. 152–162.
9. Mori T., Tanaka K. *Acta Metallurgica*. 1973, vol. 21, no. 5, pp. 571–574.
10. Muzyemnek A. Yu. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza State University]. 2016, no. 2, pp. 100–116.
11. Zhukov I. E., Milyaev A. V., Muzyemnek A. Yu., Kotosov A. A. *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: sb. tr. XX Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Actual issues of protection and safety: proceedings of XX All-Russian scientific and practical conference]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 143–148.

Богомолов Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 1, Пензенский
филиал Военной академии материально-
технического обеспечения имени
генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза-5)

E-mail: pas.pkv@rambler.ru

Bogomolov Aleksey Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department №1, Penza branch
of the Military Academy of material
logistics named after army general
A. V. Khrulyov (Penza-5, Russia)

Муземнек Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muzyemnek@yandex.ru

Muzyemnek Aleksandr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Карташова Екатерина Дмитриевна

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitrievna

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 621

Богомолов, А. И.

Модели сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых преград при ударном нагружении / А. И. Богомолов, А. Ю. Муземнек, Е. Д. Карташова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 154–167. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-2-14.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- **информатика**
- **вычислительная техника**
- **управление**
- **электроника**
- **измерительная техника**
- **радиотехника**
- **машиностроение**
- **машиноведение**

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата «____» _____ 20__ г.

