

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології

№ 45 (1217) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 45 (1217). – 96 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;

В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.; П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.;

В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.;

М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора: О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: М. І. Безменов, канд. техн. наук, проф.

Члени редколегії: І. П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;

О. В. Єфімов, д-р техн. наук, проф.; І. В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.;

В. П. Северин, д-р техн. наук, проф.; Л. М. Любчик, д-р техн. наук, проф.;

Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; Н. В. Шаронова, д-р техн. наук, проф.;

М. О. Ястребенський, д-р техн. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Системний аналіз, управління та інформаційні технології», індексується в наукометричних базах **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 23 грудня 2016 р.

УДК 519.2+539.1

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, А. Ю. СИДОРЕНКО

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ТАНКОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Проводиться імітаційне моделювання випадкових збурень при вирішенні задач параметричного синтезу танкових інформаційно-керуючих систем. Запропоновано математичну модель, що описує випадкові зовнішні збурення, які діють на танкові системи та агрегати. Ця методика полягає у виборі параметрів, що формують, динамічних ланок і двовимірних полів при використанні одновимірних і двовимірних «білих шумів». Синтезовано алгоритми побудови двовимірного дійсного нормального марківського поля другого порядку, будь-які ортогональні перетину якого є стаціонарними випадковими процесами Орнштейна – Уленбека. Змодельовані нормальні марківські поля нульового та другого порядків, що реалізовані на плоскій поверхні двох змінних при різних параметрах, що формують, динамічні ланки.

Ключові слова: імітаційне моделювання випадкових збурень, випадковий процес, марківські поля, двовимірний об'єкт, процес Орнштейна – Уленбека, генерування випадкових полів.

Проводится имитационное моделирование случайных возмущений при решении задач параметрического синтеза танковых информационно-управляющих систем. Предложена математическая модель, описывающая случайные внешние возмущения, которые действуют на танковые системы и агрегаты. Данная методика состоит в выборе параметров формирующих динамических звеньев и двумерных полей при использовании одномерных и двумерных «белых шумов». Синтезированы алгоритмы построения двухмерного вещественного нормального марковского поля второго порядка, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна – Уленбека. Смоделированы нормальные марковские поля нулевого и второго порядков, реализованные на плоской поверхности двух переменных при различных параметрах формирующих динамических звеньев.

Ключевые слова: имитационное моделирование случайных возмущений, случайный процесс, марковские поля, двумерный объект, процесс Орнштейна – Уленбека, генерирование случайных полей.

It is carried out simulation of random disturbances in solving problems of parametric synthesis of tank information management systems. A mathematical model has been describing the random external disturbances which act on the Tank system and units. This technique consists in choosing parameters dynamically generated links and two-dimensional field using a one-dimensional and two-dimensional "white noise." The algorithms for generating random two-dimensional object on the plane are used for modeling the movement of vehicles and consideration of other problems, the solution of which is Markov random field of the second order. Algorithm is synthesized for constructing two-dimensional real normal Markov field of the second order any orthogonal cross-sections of which are stationary stochastic Ornstein – Uhlenbeck process. It is shown that the proposed approach allows the synthesis of Markov random fields of higher order. Normal Markov fields of zero, first and second order, realized on the flat surface of two variables, have been modeled. In this article a sequence have been of embedded algorithms for generating random object of normal Markov field synthesized in the second row, any cross section which is orthogonal, are stationary stochastic Ornstein – Uhlenbeck processes, which differential equations are second order or higher. In this article an algorithm describes to increase the order of the random object – normal Markov field, any orthogonal cross sections which are stationary random Ornstein – Uhlenbeck process. The procedure of set out in article simulation highest disturbances acting on the tank systems and units is to select the parameters forming the dynamic links and two-dimensional fields and the use of one-dimensional and two-dimensional "white noise", the generation of which is carried out with the help of software packages.

Keywords: simulation of random disturbances, random process, Markov field, two-dimensional object, Ornstein – Uhlenbeck process, generating of random fields.

Введение. Танком называют боевую гусеничную машину высокой проходимости, в которой органически связаны подвижность, огневое могущество и броневая защита. Все три основных боевых качества танка взаимосвязаны, взаимозависимы и взаимообусловлены.

Основной танк Украины «Оплот» по праву считается одним из лучших танков мира. Дизель 6ТД – 2 мощностью 1200 л. с. обеспечивает высокие показатели подвижности при весе 48 т, не уступающих аналогичным показателям лучших зарубежных образцов. Низкий вес и, как следствие, низкое давление на грунт, составляющее $8.143 \text{ Н} \cdot \text{см}^{-2}$, обуславливают высокую проходимость отечественного основного танка. Пушка отечественного производства калибром 125 мм и высокая скорострельность, обеспечиваемая использованием отработанного механизма заряжения, определяют высокое огневое могущество танка «Оплот». Активная броневая защита обеспечивает низкую уязвимость танка на поле боя. Вместе с тем, многочисленные демонстрации украинских танков на

выставках и салонах вооружений и военной техники показывают не только их высокую эффективность, но и некоторые недостатки, основными из которых являются:

- высокая дымность отработанных газов, обусловленная отсутствием в отечественных танковых дизелях 5ТДФ МА, 6ТД-1 и 6ТД-2 регулируемого наддува, обеспечивающего более полное сгорание топлива, и современной цифровой системы управления топливopодачей и подачей воздуха;
- пониженная маневренность и управляемость танка, обусловленная отсутствием бесступенчатого механизма поворота с системой автоматического управления движением танка;
- пониженная, по сравнению с новейшими зарубежными образцами, точность стрельбы из танковой пушки, обусловленная отсутствием современного цифрового стабилизатора оси канала ствола относительно линии прицеливания.

Перечисленные недостатки отечественных танков обусловлены отсутствием современной цифровой танковой информационно-управляющей системы (ТИУС) на основе бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ). Для синтеза цифровой ТИУС необходима разработка имитационных моделей случайных внешних возмущений, действующих на танковые системы и агрегаты [1, 2], что является целью настоящей статьи.

Имитационное моделирование случайных возмущений. В основу предлагаемой методики построения имитационных моделей высших возмущений, действующих на танковые системы и агрегаты, положена известная теорема [3] о том, что спектральные плотности случайных входного $u(x)$ и выходного $h(x)$ сигналов динамического звена с передаточной функцией $W(s)$ связаны соотношением

$$S_h(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_u(\omega), \quad (1)$$

где $W(j\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) динамического звена.

Предположим, что на вход динамического звена подан некоррелированный единичный «белый шум» $u(x)$ с нулевым математическим ожиданием, спектральная плотность которого равна $S_u(\omega) = 1$. Тогда соотношение (1) принимает вид

$$S_h(\omega) = |W(j\omega)|^2, \quad (2)$$

т. е. спектральная плотность случайной функции $H(x)$ равна квадрату АЧХ динамического звена.

Допустим, что в результате стохастического анализа случайной функции $H(x)$ получена кривая её спектральной плотности $S_h(\omega)$. Тогда АЧХ динамического звена определяется формулой

$$|W(j\omega)| = \sqrt{S_h(\omega)}. \quad (3)$$

Динамическое звено с АЧХ, определяемой соотношением (3), преобразующее единичный «белый шум» $u(x)$ в случайную функцию $H(x)$ со спектральной плотностью $S_h(\omega)$, назовем формирующим динамическим звеном.

Пусть АЧХ формирующего динамического звена не содержит резонансных пиков и носит ниспадающий характер. Это означает, что формирующее динамическое звено является аperiodическим звеном первого или второго порядка, а случайный процесс Орнштейна–Уленбека [4] описывается дифференциальным уравнением

$$(Tp + 1)h(x) = \sigma_h u(x) \quad (4)$$

или

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)h(x) = \sigma_h u(x), \quad (5)$$

где T – постоянная времени формирующего аperiodического динамического звена первого порядка;

T_1, T_2 – постоянные времени формирующего аperiodического динамического звена второго порядка, причем

$$T_2^2 \geq 4T_1^2, \quad (6)$$

σ_h – интенсивность случайной функции $H(x)$, значение которой определяется соотношением

$$\sigma_h = \sqrt{S_h(0)}; \quad (7)$$

p – символ дифференцирования.

Если АЧХ формирующего динамического звена содержит резонансный пик, то такое звено является колебательным, а случайный процесс Орнштейна–Уленбека описывается уравнением (5) при условии, накладываемом на значения постоянных времени,

$$T_2^2 < 4T_1^2. \quad (8)$$

Если же АЧХ формирующего динамического звена содержит два резонансных пика, то такое звено представляет собой последовательное соединение двух колебательных звеньев и случайный процесс описывается дифференциальным уравнением

$$(T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1)(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1)h(x) = \sigma_h u(x), \quad (9)$$

где постоянные времени $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ удовлетворяют условиям

$$T_{12}^2 < 4T_{11}^2, T_{22}^2 < 4T_{21}^2.$$

Интенсивность выходного сигнала формирующего динамического звена определяет его коэффициент усиления и вычисляется с помощью формулы (7). Рассмотрим методику вычисления постоянных времени формирующего динамического звена, используя кривую спектральной плотности его выходного сигнала.

Начнем с аperiodического динамического звена первого порядка (4). Передаточная функция такого звена равна

$$W(s) = \frac{\sigma_h}{Ts + 1}. \quad (10)$$

Подставим в (10) $s = j\omega$ и в полученном соотношении выделим действительную и мнимую части

$$W(j\omega) = \frac{\sigma_h}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{\sigma_h \omega T}{1 + \omega^2 T^2}.$$

Введем обозначения

$$U(\omega) = \text{Re } W(j\omega) = \frac{\sigma_h}{1 + \omega^2 T^2};$$

$$V(\omega) = \text{Im } W(j\omega) = -\frac{\sigma_h \omega T}{1 + \omega^2 T^2}.$$

Тогда квадрат АЧХ рассматриваемого звена, представляющий собой в соответствии с (2) кривую

спектральной плотности его выходного сигнала, определяется формулой

$$S_h(\omega) = U^2(\omega) + V^2(\omega) = \frac{\sigma_h^2}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (11)$$

Через ω^* обозначим значение частоты, при котором $S_h(\omega^*) = 0.5S_h(0) = 0.5\sigma_h^2$. Тогда в соответствии с (11) имеем

$$0.5\sigma_h^2 = \frac{\sigma_h^2}{1 + (\omega^*)^2 T^2}. \quad (12)$$

Из отношения (12) находим искомое значение T

$$T = \frac{1}{\omega^*}.$$

Формирующее аperiodическое звено второго порядка содержит две неизвестные постоянные времени T_1 и T_2 , удовлетворяющих условию (6). Квадрат АЧХ такого звена определяется соотношением

$$S_h(\omega) = \frac{\sigma_h^2}{(1 - \omega^2 T_1^2)^2 + \omega^2 T_2^2}. \quad (13)$$

Через ω_1^* обозначим значение частоты ω , при котором $S_h(\omega_1^*) = 0.5S_h(0) = 0.5\sigma_h^2$, а через ω_2^* – значение ω , при котором $S_h(\omega_2^*) = 0.1S_h(0) = 0.1\sigma_h^2$. Тогда для отыскания постоянных времени T_1 и T_2 имеем два уравнения

$$\begin{cases} 0.5 \left\{ \left[1 - (\omega_1^*)^2 T_1^2 \right]^2 + (\omega_1^*)^2 T_2^2 \right\} = 1 \\ 0.5 \left\{ \left[1 - (\omega_2^*)^2 T_1^2 \right]^2 + (\omega_2^*)^2 T_2^2 \right\} = 1 \end{cases}. \quad (14)$$

Формирующее колебательное звено второго порядка также содержит две неизвестные постоянные времени T_1 и T_2 , удовлетворяющие условию (8). Через ω^* обозначим частоту, соответствующую резонансному пику АЧХ. Тогда амплитуда резонансного пика составляет $S_h(\omega^*)$. При $\omega = \omega^*$ знаменатель (13) достигает минимума, т. е. выполняется соотношение

$$\frac{\partial \left[\left(1 - \omega^2 T_1^2 \right)^2 + \omega^2 T_2^2 \right]}{\partial \omega^2} = 0,$$

или

$$-2 \left(1 - \omega^2 T_1^2 \right)^2 T_1^2 + T_2^2 = 0. \quad (15)$$

Из уравнения (15) имеем

$$\left(\omega^* \right)^2 = \frac{2T_1^2 - T_2^2}{2T_1^4}. \quad (16)$$

Подставим формулу (16) в соотношение (13). В результате получаем

$$\left(3T_1^2 T_2^2 - T_2^4 \right)^2 S_h(\omega^*) = 2\sigma_h^2 T_1^4. \quad (17)$$

Из соотношений (16) и (17) легко отыскать постоянные времени T_1 и T_2 колебательного формирующего звена.

Перейдем к отысканию постоянных времени динамического звена, формирующего случайный процесс, описываемый уравнением (9). Уравнение (9) описывает случайный момент нагрузки на коленчатом вале танкового дизеля [5]. Уравнение (9) четвертого порядка представим в виде системы двух уравнений второго порядка каждое

$$\left(T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1 \right) h_1(x) = \sigma_h u(x); \quad (18)$$

$$\left(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1 \right) h_2(x) = h_1(x). \quad (19)$$

Через ω_1^* и ω_2^* обозначим значения частот, соответствующих первому и второму резонансным пикам АЧХ, а через $S_h(\omega_1^*)$ и $S_h(\omega_2^*)$ – амплитуды резонансных пиков АЧХ, соответствующих частотам ω_1^* и ω_2^* . Тогда в соответствии с формулами (16) и (17), для отыскания постоянных времени T_{11} , T_{12} , T_{21} и T_{22} имеем следующие соотношения:

$$\left(\omega_1^* \right)^2 = \frac{2T_{11}^2 - T_{12}^2}{2T_{11}^4}; \quad (20)$$

$$\left(3T_{11}^2 T_{12}^2 - T_{12}^4 \right)^2 S_h(\omega_1^*) = 2\sigma_h^2 T_{11}^4; \quad (21)$$

$$\left(\omega_2^* \right)^2 = \frac{2T_{21}^2 - T_{22}^2}{2T_{21}^4}; \quad (22)$$

$$\left(3T_{21}^2 T_{22}^2 - T_{22}^4 \right)^2 S_h(\omega_2^*) = 2\sigma_h^2 T_{21}^4. \quad (23)$$

Для стохастической оценки плавности хода танка необходимо решить задачу пространственного моделирования двумерного поля на плоской поверхности с заданными стохастическими характеристиками. Из всего многообразия возможных вариантов и моделей двумерных случайных поверхностей наиболее предпочтительным является нормальное марковское двумерное поле (НМД-поле), поскольку данный объект удобен для анализа и любое его ортогональное сечение является стационарным ОУ-процессом [5].

НМД-поле описывается в прямоугольнике $\{x \in [0; a], y \in [0; b]\}$ дифференциальным уравнением Ланжевена [5]

$$\left(T_{11}^2 p^2 + T_{12} p + 1 \right) \left(T_{21}^2 p^2 + T_{22} p + 1 \right) h(x, y) = \sigma_h u(x, y), \quad (24)$$

где $h(x, y)$ – амплитуда поля $H(x, y)$;

$u(x, y)$ – случайное поле, обладающее свойствами гауссовского двумерного «белого шума» единичность интенсивности.

Пусть γ_{1x} , γ_{2x} – решения уравнения

$$T_{11}^2 \gamma^2 + T_{12} \gamma + 1 = 0, \quad (25)$$

а γ_{1y} , γ_{2y} – решения уравнения

$$T_{21}^2 \gamma^2 + T_{22} \gamma + 1 = 0. \quad (26)$$

Тогда уравнение Ланжевена (24) можно представить в виде системы

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \gamma_{1x}\right)\left(\frac{\partial}{\partial y} + \gamma_{1y}\right)h_1(x, y) = \sigma_h u(x, y); \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \gamma_{2x}\right)\left(\frac{\partial}{\partial y} + \gamma_{2y}\right)h(x, y) = h_1(x, y). \quad (28)$$

Из рассмотрения уравнений (27), (28) следует, что для НМД-поля второго порядка $H(x, y)$ производящим является НМД-поле $H_1(x, y)$ первого порядка, а для НМД-поля $H_1(x, y)$ первого порядка производящим является поле «белого шума» $H_0(x, y) = u(x, y)$ нулевого порядка.

Решения системы дифференциальных уравнений (27) и (28) записываются [7]

$$\begin{aligned} h_1(x, y) = & \exp(-\gamma_{1x}x - \gamma_{1y}y)h_1(0, 0) + \\ & + \sqrt{2\gamma_{1x}}\sigma_h \int_0^x \exp[-\gamma_{1x}(x-x')]u(x', 0)dx' + \\ & + \sqrt{2\gamma_{1y}}\sigma_h \int_0^y \exp[-\gamma_{1y}(y-y')]u(0, y')dy' + \\ & + \sqrt{4\gamma_{1x}\gamma_{1y}}\sigma_h \times \\ & \times \int_0^x \int_0^y \exp[-\gamma_{1x}(x-x') - \gamma_{1y}(y-y')]u(x', y')dx'dy', \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} h(x, y) = & \exp(-\gamma_{2x}x - \gamma_{2y}y)h(0, 0) + \\ & + \sqrt{2\gamma_{2x}}\sigma_h \int_0^x \exp[-\gamma_{2x}(x-x')]h_1(x', 0)dx' + \\ & + \sqrt{2\gamma_{2y}}\sigma_h \int_0^y \exp[-\gamma_{2y}(y-y')]h_1(0, y')dy' + \\ & + \sqrt{4\gamma_{2x}\gamma_{2y}}\sigma_h \times \\ & \times \int_0^x \int_0^y \exp[-\gamma_{2x}(x-x') - \gamma_{2y}(y-y')]h_1(x', y')dx'dy'. \end{aligned} \quad (30)$$

Если предположить, что стохастические характеристики НМД-поля одинаковы в направлениях x и y , то $T_{11} = T_{21}$, $T_{12} = T_{22}$, $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_1$, $\gamma_{2x} = \gamma_{2y} = \gamma_2$. Значения констант соотношений (29) и (30), определяющих НМД-поле для различных поверхностей движения, приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1 – Значения констант соотношений (29)–(30)

Тип поверхности	σ_h	γ_1	γ_2
Асфальт-тобетон	0.012	$-0.192 + j \cdot 0.400$	$-0.192 - j \cdot 0.400$
Мостовая	0.024	$-0.106 + j \cdot 0.661$	$-0.106 - j \cdot 0.661$
Грунтовая дорога	0.105	$-0.337 + j \cdot 1.010$	$-0.337 - j \cdot 1.010$

Алгоритм генерации нормального марковского двумерного поля второго порядка.

С помощью решений (29)–(30) можно построить числовой алгоритм генерации НМД-поля $H(x, y)$ [9]. Этот алгоритм так же, как и для поля $H_1(x, y)$, будет иерархическим алгоритмом генерации значений в узлах случайного нормального стационарного марковского поля в прямоугольной области со сторонами a и b . Для такого же прямоугольника с вершиной в точке с координатами $(0; 0)$ на координатной плоскости xOy обозначим сетку $\{0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M\}$ узлов с шагом Δ_x по оси Ox и с шагом Δ_y по оси Oy , для которых $N\Delta_x = a$ и $M\Delta_y = b$.

Тогда искомым иерархический алгоритм генерации значений $\{h_{n,m}, 0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M\}$ НМД-поля $H(x, y)$ можно задать такими шагами:

Этап 1. Генерация НМД-поля первого порядка:

Шаг 1. Генерация значения в вершине, $(n = 0, m = 0)$:

$$a_{0,0} = u_{0,0}. \quad (31)$$

Шаг 2. Генерация значений ОУ-процесса (в общем случае комплекснозначного) вдоль x -границы прямоугольника, $(n > 0, m = 0)$:

$$a_{n+1,0} = p_1 a_{n,0} + \sqrt{1-p_1^2} u_{n+1,0}. \quad (32)$$

Шаг 3. Генерация значений ОУ-процесса (в общем случае комплекснозначного) вдоль y -границы прямоугольника, $(n = 0, m > 0)$:

$$a_{0,m+1} = q_1 a_{0,m} + \sqrt{1-q_1^2} u_{0,m+1}. \quad (33)$$

Шаг 4. Последовательное (слева-направо и послойно) заполнение значениями внутренних узлов прямоугольника, $(n > 0, m > 0)$:

$$\begin{aligned} a_{n+1,m+1} = & p_1 a_{n,m+1} + q_1 a_{n+1,m} - p_1 q_1 a_{n,m} + \\ & + \sqrt{(1-p_1^2)(1-q_1^2)} u_{n+1,m+1}. \end{aligned} \quad (34)$$

Шаг 5. Нормирование полученного поля, $(n \geq 0; m \geq 0)$:

$$b_{n,m} = \frac{a_{n,m}}{\sqrt{4\gamma_{1x}\gamma_{1y}}}. \quad (35)$$

В соотношениях (31)–(35) $p_1 = \exp(-\gamma_{1x}\Delta_x)$, $q_1 = \exp(-\gamma_{1y}\Delta_y)$, где $\gamma_{1,x}$ и $\gamma_{1,y}$ – первая пара парциальных декрементов, Δ_x и Δ_y – шаги узлов вдоль осей Ox и Oy .

Этап 2. Генерация НМД-поля второго порядка:

Шаг 6. Генерация значения в вершине, $(n = 0, m = 0)$:

$$g_{0,0} = b_{0,0}. \quad (36)$$

Шаг 7. Генерация значений ОУ-процесса (в общем случае комплекснозначного) вдоль x -границы прямоугольника, ($n > 0, m = 0$):

$$g_{n+1,0} = p_2 g_{n,0} + \sqrt{1-p_2^2} b_{n+1,0}. \quad (37)$$

Шаг 8. Генерация значений ОУ-процесса (в общем случае комплекснозначного) вдоль y -границы прямоугольника, ($n = 0, m > 0$):

$$g_{0,m+1} = q_2 g_{0,m} + \sqrt{1-q_2^2} b_{0,m+1}. \quad (38)$$

Шаг 9. Последовательное (слева-направо и послыюно) заполнение значениями внутренних узлов прямоугольника ($n > 0, m > 0$):

$$g_{n+1,m+1} = p_2 g_{n,m+1} + q_2 g_{n+1,m} - p_2 q_2 g_{n,m} + \sqrt{(1-p_2^2)(1-q_2^2)} u_{n+1,m+1}. \quad (39)$$

Шаг 10. Нормирование полученного поля ($n \geq 0; m \geq 0$):

$$h_{n,m} = \sigma_h g_{n,m} / \sqrt{4\gamma_{2,x}\gamma_{2,y}}. \quad (40)$$

В выражениях (36)–(40) декрементные множители $p_2 = \exp(-\gamma_{2,x}\Delta_x)$, $q_2 = \exp(-\gamma_{2,y}\Delta_y)$, где $\gamma_{2,x}$ и $\gamma_{2,y}$ – вторая пара парциальных декрементов.

Используя соотношения (31)–(40) осуществим построение поля «белого шума» $u(x, y)$ нулевого порядка и НМД-полей второго порядка $H(x, y)$, соответствующих различным типам поверхностей движения танка. Эти поля представлены на рис. 1–4 с шагом по координатам x и y равным 1 м для заданных размеров (50×50).

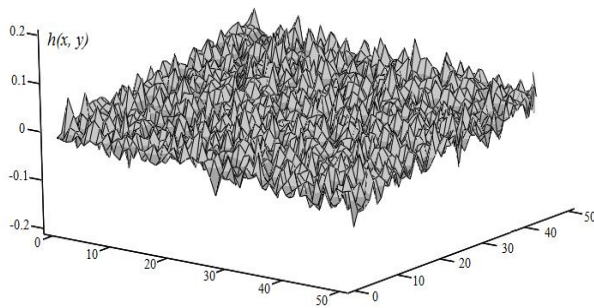


Рис. 1 – Порождающее НМД-поле нулевого порядка

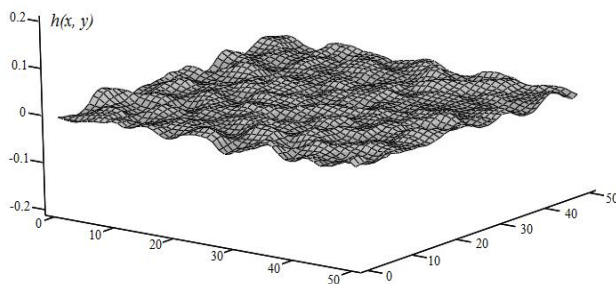


Рис. 2 – Порожденное НМД-поле второго порядка $h(x, y)$ (асфальтобетон)

Выводы. Изложенная в статье методика имитационного моделирования высших возмущений, дейст-

вующих на танковые системы и агрегаты, состоит в выборе параметров формирующих динамических звеньев двумерных полей и использовании одномерных и двумерных «белых шумов». Построены НМД-поля нулевого и второго порядков, реализованные на плоской поверхности двух переменных при различных параметрах.

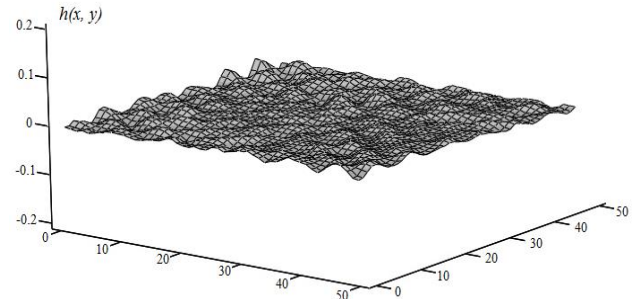


Рис. 3 – НМД-поле второго порядка $h(x, y)$ (мостовая)

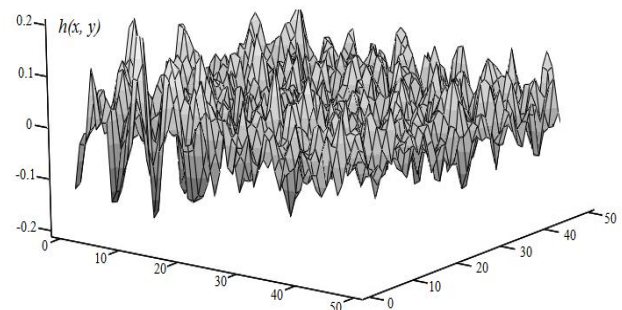


Рис. 4 – НМД-поле второго порядка (грунтовая дорога)

Список литературы

1. Александров Е. Е. Автоматизация отечественных объектов бронетанковой техники / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Матеріали ХХІІ міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика 2015». – Одеса. ТЕС, 2015. – С. 200–202.
2. Александров Е. Е. Параметрический синтез цифровой системы стабилизации танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2015. – № 6. – С. 5–20.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Физматгиз, 1964. – 576 с.
4. Мазманишвили А. С. Алгоритм генерации нормального марковского поля на поверхности идеального цилиндра / А. С. Мазманишвили // Электронное моделирование. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 65–69.
5. Александров Е. Е. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, А. Н. Туренко. – Харьков : ХНАДУ, 2001. – 642 с.
6. Александрова Т. Е. Стохастическая оценка плавности хода многоопорного транспортного средства / Т. Е. Александрова, М. Д. Борисюк, А. С. Мазманишвили // Доповіді НАН України. – 2013. – № 6. – С. 52–59.
7. Александрова Т. Е. Стохастическое моделирование поверхности движения объектов бронетанковой техники / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 2 (100). – С. 63–66.
8. Александрова Т. Е. Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 1 (29). – С. 68–71.
9. Мазманишвили А. С. Повышение порядка двумерных марковских полей / А. С. Мазманишвили, А. Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 110–120.

References (transliterated)

1. Aleksandrov E. E., Aleksandrova T. E., Avtomatyzatsiyya otechestvennikh ob'ektov bronetankovoy tehniki [The Automation of the Ukrainian armored vehicles]. *Materialy XXII mignarodnoyi konferentsii s avtomatichno upravlinnya "Avtomatika 2015"*. [Materials of the XXII International Conference on Automatic Control "Automatics 2015"]. Odesa, 2015, pp. 200–202.
2. Aleksandrov E. E., Aleksandrova T. E., Parametrycheskiy sintez tsyfrovoy systemy stabilizatsyy tankovoy pushki [Parametric synthesis of digital systems tank gun stabilization]. *Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal "Problemy upravleniya i informatiki"*. [International scientifically technical journal "Problems of Management and Informatics"]. 2015, no. 6, pp. 5–20.
3. Ventsel' E. S. *Teoriya veroyatnostey* [The theory of Probability]. Moscow, Fismatgis Publ., 1964, 576 p.
4. Mazmanishvaili A. S. Algoritm generatsyy normal'nogo markovskogo polya na poverhnosti ideal'nogo tsylindra [The algorithm of generation of Markovski normal field on the surface of an ideal cylinder]. *Elektronnoe modelirovanie* [Electronic modeling]. 1998, vol. 20, no. 6, pp. 65–69.
5. Aleksandrov E. E., Volontsevich D. O., Turenko A. N. *Dinamika transportno-tyagovykh kolesnykh i gusenichnykh mashyn* [The dynamics of transport and traction of wheeled and tracked vehicles]. Kharkiv, HNADU Publ., 2001, 642 p.
6. Aleksandrova T. E., Borisyuk M. D., Mazmanishvaili A. S. Stokhasticheskaya otsenka plavnosti hoda mnogoopornogo transportnogo sredstva [The stochastic evaluation of multisupport ride vehicle]. *Dopovidi NAN Ukrainy* [Reports of NAS of Ukraine]. 2013, no. 6, pp. 52–59.
7. Aleksandrova T. E., Mazmanishvaili A. S. Stokhasticheskoe modelirovanie poverhnosti dvigeniya ob'ektov bronetankovoy tehniki [The stochastic modeling of surface movement of armored vehicles]. *Sistemy obrobky informatsii* [The information processing systems]. 2012, no. 2 (100), pp. 63–66.
8. Aleksandrova T. E., Mazmanishvaili A. S. Postroyeniye sluchaynykh poverhnostey dvizheniya ob'ektov bronetankovoy tehniki [The construction of random surface movement of armored vehicles] *Sistemy ozbroennyya i viys'kova tehnika* [The Weapons systems and military equipment]. 2012, no. 1 (29), pp. 68–71.
9. Masmanishvili A. S., Sydorenko G. Y. Povysheniye poryadka dvumernykh markovskikh poley [Algorithm of increasing of two-dimensional Markov field's order]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 3 (977), pp. 110–120.

Поступила (received) 05.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Імітаційне моделювання випадкових збурень при вирішенні задач параметричного синтезу інформаційно-керованих систем/ Т. Є. Александрова, О. С. Мазманішвілі, Г. Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 3–8. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

Имитационное моделирование случайных возмущений при решении задач параметрического синтеза танковых информационно-управляющих систем / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманішвили, А. Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 3–8. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

The simulation of random perturbations in solving the problem of parametric synthesis tank management information systems / Т. Е. Aleksandrova, А. S. Masmanishvili, G. Y. Sydorenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 3–8. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Александрова Тетяна Євгенівна – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедри системного аналізу та управління; тел.: (099) 089-90-50; e-mail: alexandrova.t.ye@gmail.com.

Александрова Татьяна Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и управления; тел.: (099) 089-90-50; e-mail: alexandrova.t.ye@gmail.com.

Aleksandrova Tetyana Evgeniivna – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of analysis of the systems and management; tel.: (099) 089-90-50; e-mail: alexandrova.t.ye@gmail.com.

Мазманішвілі Олександр Сергійович – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; тел.: (067) 799 38 64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Мазманішвили Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков; тел.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, senior staff scientist NNC KhFTI, Kharkiv; tel.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Сидоренко Ганна Юрївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та управління; тел.: (095) 392-54-39; e-mail: sau123@ukr.net.

Сидоренко Анна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (095) 392-54-39; e-mail: sau123@ukr.net.

Sydorenko Ganna Yurijivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of analysis of the systems and management; tel.: (095) 392-54-39; e-mail: sau123@ukr.net.

И. И. МАРЧЕНКО, А. В. ЖИГЛО, И. Г. МАРЧЕНКО

ТЕМПЕРАТУРНО-АНОМАЛЬНАЯ ДИФФУЗИЯ В НЕДОДЕМПФИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В роботі досліджено посилення дифузії частинок в просторово-періодичних структурах під впливом періодичних в часі полів. Показано, що дифузія може бути довільним чином посилена (на багато порядків) при виборі відповідних температур, амплітуд і частот зовнішнього поля. Встановлено, що при амплітудах перевищують критичний рівень, в температурній залежності виникає область температурно-аномальної дифузії (ТАД) при якій коефіцієнт дифузії зростає з пониженням температури.

Ключові слова: дифузія, комп'ютерне моделювання, періодичні структури, рівняння Ланжевена, періодичні поля.

В работе исследовано усиление диффузии частиц в пространственно-периодических структурах под воздействием периодических во времени полей. Показано, что диффузия может быть произвольным образом усилена (на многие порядки) при выборе соответствующих температур, амплитуд и частот внешнего поля. Установлено, что при амплитудах превышающих критический уровень, в температурной зависимости возникает область температурно-аномальной диффузии (ТАД) при которой коэффициент диффузии возрастает с понижением температуры.

Ключевые слова: диффузия, компьютерное моделирование, периодические структуры, уравнения Ланжевена, периодические поля.

We have investigated the strengthening of the diffusion of particles in a spatially periodic structures under the influence of periodic in time fields. It is shown that diffusion can be arbitrarily enhanced (many orders of magnitude) in the selection of appropriate temperatures, amplitudes and frequencies of the external field. The physical reason behind the strong diffusivity enhancement is emergence of two populations of particles under the action of external force, locked and running ones. At optimal forces and temperature the number of particles in the two populations is comparable, long flights of the running particles relative to the locked population take place with significant probability, resulting in giant enhancement of diffusion. It was found that the amplitudes exceeding the critical level, the temperature dependence in a region temperature abnormal diffusion (TAD) in which the diffusion coefficient increases with decreasing temperature.

Keywords: diffusion, computer simulation, periodic structures, Langevin equation, time-periodic fields.

Введение. Диффузия и транспорт в периодических структурах играет ключевую роль во многих физических, химических и биологических процессах [1, 2]. Интерес к изучению процессов транспорта частиц в наклонных периодических потенциалах (washboard potentials) связан с широким кругом физических систем, которые ими описываются. К таким системам относятся контакты Джозефсона, суперионные проводники, волны зарядовой плотности, системы фазовой автоподстройки частоты и пр. [3].

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к экспериментальным исследованиям ускорения диффузии частиц путем приложения внешнего поля. Изменяя характеристики поля можно эффективно управлять процессами диффузии. Так при изучении диффузии частиц в коллоидном растворе с оптическими ловушками (так называемые оптические вихри) наблюдалось гигантское увеличение диффузии в сотни раз превышающее равновесное [4]. Так же сильное возрастание коэффициента диффузии отмечалось при изучении диффузии парамагнитных частиц по поверхности феррогранатов под воздействием внешнего периодического во времени магнитного поля [5]. Возрастание коэффициента диффузии было так же замечено в экспериментах с гранулярным газом [6]. Помимо непосредственного увеличения скорости физических процессов, лимитированных скоростью диффузии, изменяя коэффициенты диффузии в различных направлениях можно эффективно сепарировать нано- и микро-частицы различной природы [7].

Однако до настоящего времени не установлены основные закономерности такой ускоренной диффузии под воздействием сил различной

амплитуды в системах с различным уровнем диссипации энергии.

В зависимости от степени диссипации энергии в системе, описываемой коэффициентом трения γ , различают недодемпфированные ($\gamma/m \ll \omega_0$) и передемпфированные системы ($\gamma/m \gg \omega_0$), где ω_0 – период собственных малых колебаний, m – масса частиц. В недодемпфированных системах трение мало и затухание колебаний происходит за время большее, чем период собственных колебаний. Для передемпфированных систем можно не учитывать инерционные эффекты, и соответственно математическое рассмотрение в этом случае существенно упрощается.

Диффузия под воздействием постоянной силы изучалась в работах К. Линденберг с соавторами [16–19]. В [16] исследовалось поведение дисперсии ансамбля частиц во времени. Было впервые показано, что в недодемпфированных системах возникает ограниченный во времени режим «dispersionless» транспорта, когда дисперсия не изменяется. Авторами были объяснены причины этого явления и показано, что возникает сильно неравновесное (экспоненциальное в пространстве) распределение частиц которое слабо изменяется вплоть до времени, когда устанавливается гауссово распределение. Ими была так же исследована температурная зависимость диффузии [19]. Было показано, что максимальное значение коэффициента диффузии достигается вблизи некоторой критической силы. Исследования температурной зависимости диффузии показало, что коэффициент диффузии ведет себя аномальным образом: растет с понижением температуры. Подгонка данных компьютерного моделирования дала следующую

шую степенную зависимость от обратной температуры: $D_{\max} \sim T^{-3.5}$

Существование аномальной температурной зависимости отличает недодемпфированные системы от передемпфированных. Для передемпфированных систем Reimann с соавторами [20–21] аналитически показали, что для синусоидального пространственного потенциала в критической точке отношение D_{\max} к диффузии частиц в вязкой среде возрастает с уменьшением температуры как $D_{\max} \sim T^{-2/3}$. Однако при этом абсолютное значение диффузии с температурой увеличивается как $D_{\max} \sim T^{1/3}$.

Возникновение аномальной температурной зависимости диффузии частиц в системах с малой диссипацией связана с увеличением длины скачков «бегущих» частиц с понижением температуры. Диффузия в недодемпфированных системах интересна тем, что в отличие от передемпфированных систем, для ее увеличения можно прикладывать силы, существенно меньшие, чем для прямого «силового» перетаскивания частиц через потенциальный барьер.

Более детальное рассмотрение диффузии в недодемпфированных системах было проведено в работе [22]. Было установлено, что temperature abnormal diffusion (TAD) наблюдается только в узком интервале приложенных внешних сил. Исследования в широком диапазоне температур показали, что коэффициент диффузии возрастает с понижением температуры экспоненциальным образом: $D_{\max} \sim \exp(1/kT)$. Показано, что физической причиной такой зависимости является экспоненциальный рост корреляционного времени с падением температуры. Дальнейшее развитие эти исследования получили в работе [23], где была построена феноменологическая модель, обобщающая модель Рискена, и выведена аппроксимационная формула для подвижности частиц. Эта формула находится в отличном соответствии с данными компьютерного моделирования для широкого интервала, как коэффициентов трения, так и действующих сил. В этой же работе было показано, что наблюдаемое экспоненциальное возрастание коэффициента диффузии определяется двухямыным видом эффективного потенциала $W(V)$ в пространстве скоростей.

Поведение коэффициента диффузии при воздействии постоянной силы имеет большой академический интерес. В то же время технически значительно проще реализуются различные периодические во времени поля (электромагнитные, акустические и пр.). Поэтому вопрос о влиянии периодических полей на диффузионные процессы представляет собой не только научный, но и практический интерес. Изменяя должным образом, коэффициент диффузии с помощью внешних периодических полей можно создавать поверхностные структуры с заданными свойствами, влиять на динамику точечных дефектов, в том числе и под облучением, изменять динамику движения

дислокаций, ускорять скорость химических реакций в выбранных направлениях, влиять на скорость протекания процессов в биологических объектах и пр.

Вопрос о влиянии параметров внешнего периодического поля на диффузионную подвижность впервые изучался в работе [24,25]. Исследуя передемпфированные системы П. Риман показал, что в двухмерных системах с потенциалом Юкавы возможно существенное усиление подвижности частиц под действием периодического поля. При этом при определенных параметрах потенциала наблюдался TAD [25]. В работе [24] исследовались недодемпфированные системы. Было установлено, что в таких системах, воздействуя периодическим полем, можно на многие порядки изменять коэффициент диффузии частиц, находящихся в синусоидальном потенциале. В недодемпфированных системах так же наблюдаться TAD при периодическом воздействии. Однако, в отличие от передемпфированных систем, в недодемпфированных системах TAD наблюдалась и под воздействием постоянного поля. Однако, этот эффект проявлялся только в определенном интервале частот [26].

Исследования в работе [26] проводились лишь для одного значения амплитуды внешнего поля. До настоящего времени остается открытым вопрос о том, как связаны результаты этого исследования со случаем постоянного поля и какова функциональная зависимость аномального роста диффузии при падении температуры? Для экспериментального исследования TAD и усиления диффузии внешними периодическими полями важно знать качественный вид частотных и амплитудных зависимостей усиления диффузии.

Целью данной работы являлось установление качественного вида температурной зависимости диффузии для периодических полей различной амплитуды.

Методика моделирования. Движение частицы на одномерной решетке под действием внешней силы F_t описывалось уравнением Ланжевена:

$$m \ddot{x} = -\frac{\partial}{\partial x} U(x) - \gamma \dot{x} + F_t(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где t – время, x – координата частицы в одномерной решетке, m – ее масса, γ – коэффициент трения; точка сверху означает дифференцирование по времени; член $\xi(t)$ описывает термические флуктуации; точка сверху означает дифференцирование по времени.

Предполагается, что шум является гауссовым белым и соответственно для термических флуктуаций выполняется соотношение:

$$\langle \xi(t) \xi(t') \rangle = 2\gamma k T \delta(t - t'), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура.

В простейшем случае потенциальная энергия частицы U в одномерной периодической решетке может быть записана следующим образом:

$$U(x) = -\frac{U_0}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right), \quad (3)$$

где a – постоянная решетки, а U_0 – высота потенциального барьера.

На движущуюся частицу действует периодическая сила со стороны решетки F_{lat} :

$$F_{\text{lat}} = -\frac{\partial U}{\partial x} = F_{\text{cr}} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right). \quad (4)$$

Величина $F_{\text{cr}} = \frac{\pi}{a}U_0$, называемая критической силой [16, 21], соответствует минимальной действующей силе, необходимой для преодоления в вязкой среде энергетического барьера, разделяющего два соседних положения частицы на одномерной решетке.

Параметры используемого пространственно-периодического потенциала были теми же, что и в работах [22, 23]. Величина U_0 составляла 80 мэВ – величину характерную для диффузии по плотноупакованным поверхностям металлов. Постоянная одномерной решетки была выбрана равной 2 Å.

В работе исследовалось прямоугольное периодическое поле:

$$F_x(t) = F_0 \text{sign}(\sin(\omega t)), \quad (5)$$

где ω – угловая частота внешней силы, а F_0 – ее амплитуда.

Стохастические уравнения (1)–(2) для каждой частицы решались численно методом Эйлера [27] с шагом по времени составляющим менее 0.01 периода собственных малых колебаний. Статистическое усреднение проводилось по ансамблю с количеством частиц не менее $N = 5 \cdot 10^4$. Для проверки полученных результатов отдельные вычисления проводились с $N = 5 \cdot 10^6$. Начальные условия задавались следующим образом. Частица помещалась в начале координат и ей случайным образом сообщалась скорость, имеющая Максвелловское распределение по температуре. Для достижения равновесной функции распределения частиц, как по скоростям, так и по координатам проводилась термолизация системы в течение 10^4 временных шагов. Как показали расчеты, после этого времени, распределение, как по координатам, так и по скоростям ансамбля частиц не менялось. В процессе термолизации частицы могли совершать скачок в соседние элементарные ячейки одномерной решетки. Для того чтобы диффузия частиц происходила из начала координат, такие частицы перемещались в первую элементарную ячейку путем трансляции на целое количество постоянных решетки.

При анализе результатов моделирования удобно перейти к безразмерным величинам времени t' и расстояния x' [4, 8]:

$$t' = t \frac{1}{a} \sqrt{\frac{U_0}{m}}, \quad x' = \frac{x}{a}. \quad (7)$$

Для сопоставления данных полученных в данной работе с данными других авторов использовались безразмерные величины температуры T' и трения γ' [9].

$$T' = \frac{Tk}{U_0}; \quad \gamma' = \frac{\gamma a}{(mU_0)^{1/2}}, \quad (8)$$

В работе изучалось недодемпфированное движение частиц. Значение коэффициента трения $\gamma' = 0.14$ соответствовало использованному ранее [7].

Коэффициент диффузии вычислялся по дисперсии σ^2 в распределении ансамбля движущихся частиц при стремлении времени к бесконечности:

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\text{ef}}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle}{2t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sigma^2}{2t}, \quad (9)$$

где скобки $\langle \dots \rangle$ обозначают усреднение по ансамблю. При каждом расчете коэффициента диффузии определялось время t_{lin} достижения линейной зависимости дисперсии от времени. Коэффициент диффузии определялся при времени $t > 100t_{\text{lin}}$.

Известно, что в системах, характеризующихся низким уровнем диссипации энергии, возможно возникновение особых, ограниченные во времени, режимов диффузии: так называемой субдиффузии и супердиффузии [16, 28, 29]. Обычная диффузия характеризуется линейной зависимостью дисперсии координаты частиц x от времени t :

$$\sigma^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle \propto t, \quad (10)$$

В случае реализации особых режимов диффузии эта зависимость изменяется:

$$\sigma^2 \propto t^\alpha. \quad (11)$$

При показателе степени $\alpha < 1$ говорят о субдиффузии, а при $\alpha > 1$ – о супердиффузии.

Показатели α в работе определялись подгонкой по методу наименьших квадратов линейной зависимости $\ln(\sigma^2)$ от $\ln(t)$ на ограниченном интервале времени.

Результаты и обсуждение. Ранее в работе [22] было показано, что при воздействии постоянной внешней силы, в зависимости от ее величины, могут реализовываться функционально различные температурные зависимости коэффициента диффузии. Результаты этих исследований приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что существует три области (I–III) различающихся поведением коэффициента диффузии D с температурой. В первой области диффузия усиливается с ростом приложенной силы, а в области III – падает. Однако в то время как в областях I и III коэффициент диффузии возрастает с ростом

температуры, в области **II** (на рисунке выделена штриховкой) он с понижением температуры растет. Это область температурно-аномальной диффузии (ТАД). Диффузия является «нормальной», т. е. $\sigma^2 \propto t$, однако в отличие от обычной температурной зависимости, коэффициент диффузии в области **II**, экспоненциально растет понижением температуры [22]. В работе [24], было установлено, что ТАД также наблюдается при воздействии на частицу периодической во времени силы. Однако режим ТАД реализовывался только в определенном интервале частот. В работе [24] исследования проводились лишь при одном значении амплитуды внешней силы: $F_0 = 0.15F_{cr}$. То есть амплитуда F_0 лежала в области **III**, в которой при воздействии постоянной силы ТАД не наблюдалась.

Для выяснения физических причин аномальной температурной зависимости диффузии в случае постоянной и периодической силы рассмотрим движение частиц под воздействием прямоугольного периодического поля (5). Такой вид внешнего поля имеет преимущество перед синусоидальным с точки зрения простоты интерпретации физических результатов. Как было показано ранее [22], каждому значению постоянной силы соответствует эффективный потенциал $W(V)$. При воздействии прямоугольного периодического поля на каждом полупериоде частица движется в фиксированном потенциале. В случае же синусоидальной зависимости, в силу изменения величины действующей силы, эффективный потенциал $W(V)$ непрерывно изменяется по периоду. Это значительно усложняет анализ и без того непростой задачи.

При прямоугольной форме внешнего поля, при малых частотах на интервале, соответствующем полупериоду колебаний, можно использовать полученные ранее данные по особенностям диффузии в постоянном силовом поле. Для исследования амплитудной зависимости усиления диффузии под воздействием внешнего поля разобьем весь интервал амплитуд внешнего поля на три области (**I–III**) в соответствии с диаграммой рис. 1. Интуитивно понятно, что при $\omega \rightarrow 0$ решение для периодического поля должно совпадать со случаем постоянного во времени поля. В дальнейшем мы исследуем, как будут изменяться зависимости диффузии от температуры с частотой при различных амплитудах.

Ранее нами было показано, что движение ансамбля недомпфированных частиц на одномерной решетке под воздействием постоянной силы [23] может быть сведено к задаче о движении ансамбля передомпфированных частиц в эффективном потенциале $W(V)$ в пространстве скоростей V . По своему существу задача оказалась очень схожей с задачей, рассматриваемой в статье [28] о движении активных частиц в двухъямном потенциале. Однако в отличие от рассмотрения Линднера и Николя где возможные минимумы потенциала симметричны относительно нулевого значения скорости, минимумы

$W(V)$ при движении на одномерной решетке могут реализоваться при $V = 0$ и (или) $V = F/\gamma$. Как было показано ранее [12], одновременное существование двух минимумов возможно только в узком интервале приложенных сил, определяемом диссипативными свойствами системы. В этом интервале возможны два различных детерминированных решения для движущихся частиц. Это локализованное решение ($V = 0$) и бегущее ($V = F/\gamma$). Реализация того или иного решения зависит от начальной скорости частицы. Как было показано ранее [23], необходимым условием возникновения ТАД является возможность одновременного сосуществования бегущих и локализованных решений.

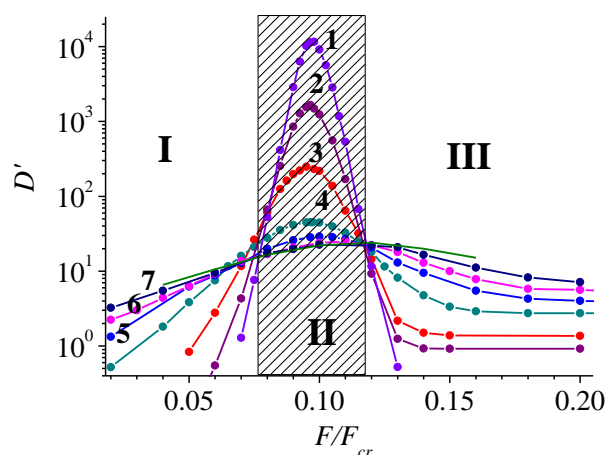


Рис. 1 – Зависимость безразмерного коэффициента диффузии от величины действующей силы для различных температур. Область аномальной температурной зависимости (**II**) заштрихована. Коэффициент трения $\gamma' = 0.141$, $1 - T' = 0.097$, $2 - T' = 0.129$, $3 - T' = 0.194$, $4 - T' = 0.388$, $5 - T' = 0.582$, $6 - T' = 0.776$, $7 - T' = 0.969$

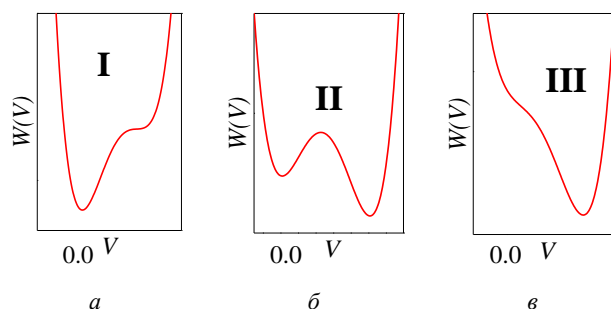


Рис. 2 Схематический вид эффективного потенциала частиц в пространстве скоростей для выбранных значений амплитуды в различных областях диаграммы, приведенной на рис. 1: $a - F_0/F_{cr} = 0.06$, $b - F_0/F_{cr} = 0.095$, $v - F_0/F_{cr} = 0.25$

Выберем исследуемые значения амплитуд внешнего поля в различных участках диаграммы рис. 1. Качественный вид эффективного потенциала $W(V)$ для выбранных значений приведен на рис. 2.

Значение $F/F_{cr} = 0.06$ находится в первой области диаграммы. Под воздействием постоянной силы здесь в отсутствии шума возможно только стационарное локализованное решение. Второе выбранное значение силы $F/F_{cr} = 0.095$ относится к области II. В этой области возможны 2 вида стационарных решений. При значении $F/F_{cr} = 0.10$ наблюдался максимальный коэффициент диффузии. И третье значение амплитуды $F/F_{cr} = 0.25$ относится к области III, когда существует только стационарное бегущее решение. Местоположение различных областей (I–III) зависит от коэффициента трения γ и массы частиц и может быть определено из формализма, предложенного в работе [23]. Качественно картина выглядит следующим образом: с уменьшением γ область II сдвигается в сторону меньших значений действующей силы, а ее ширина уменьшается.

Рассмотрим, как изменяется с частотой дисперсия для различных выбранных амплитуд. В качестве примера исследуемых зависимостей, на рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе показано изменение дисперсии частиц во времени при воздействии поля различной частоты имеющего амплитуду $F_0/F_{cr} = 0.06$. Как видно из рис. 1, при постоянно действующей силе это значение относится к области I. Время на рисунке приведено в единицах периода τ_0 собственных малых колебаний в потенциале (4):

$$\tau_0 = a \sqrt{\frac{2m}{U_0}}. \quad (10)$$

Кривая 4 на рис. 3 соответствует постоянной силе. Величина τ_1 соответствует среднему времени выхода ансамбля частиц из потенциальной ямы. Как следует из этого графика, в интервале времени от $\tau \approx \tau_1$ до $\tau \approx \tau_2$ дисперсия растет как $\sigma^2 \propto t^\alpha$ где $\alpha = 2.3$. То есть на этом временном интервале наблюдается режим супердиффузии. Однако в дальнейшем дисперсия изменяется пропорционально времени, и соответственно реализуется обычная диффузия с $\alpha = 1$. Кривые 1–3 на рисунке отвечают различным частотам воздействия внешнего поля. Кривая 1 соответствует самой высокой представленной на рисунке частоте. И, как видно из рисунка, соответствующий коэффициент диффузии – самый низкий. Понижение частоты приводит к возрастанию коэффициента диффузии.

Наличие ограниченной во времени фазы супердиффузии во всех исследованных областях амплитуд приводит к возникновению аномальных температурных зависимостей диффузии.

На рис. 4 приведено изменение коэффициента диффузии от обратной температуры для полей различной амплитуды при фиксированной частоте. Незаполненными маркерами на рисунке приведена зависимость коэффициента диффузии в отсутствие

внешнего поля. Как видно из рис. 4 при малой амплитуде поля коэффициент диффузии D растет с повышением температуры во всем рассмотренном температурном интервале. В области низких температур коэффициент D хорошо аппроксимируется зависимостью $D \sim \exp(-|\varepsilon|/kT)$. В отсутствие поля $\varepsilon = U_0$, а с повышением амплитуды поля ε уменьшается.

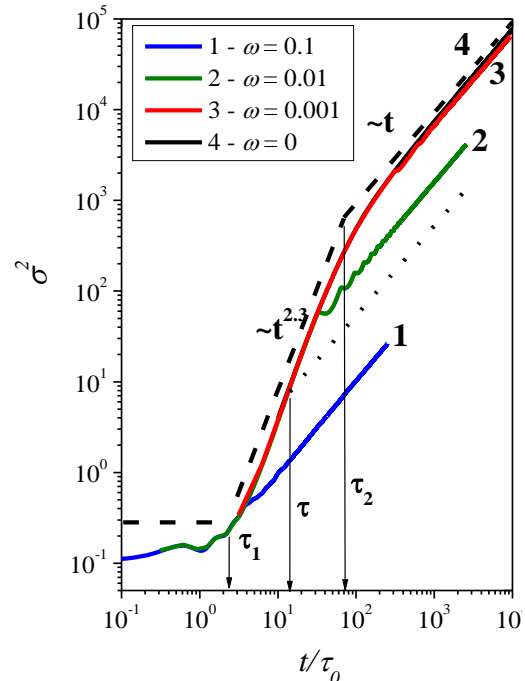


Рис. 3. Зависимость безразмерной дисперсии частиц от времени в области I для различных частот при внешнем воздействии периодической ступенчатой функции. Амплитуда поля $F_0/F_{cr} = 0.06$, $T = 0.194$. τ_2 – время супердиффузии, τ – период колебаний внешнего поля. 1 – $\omega = 10^{-1}$, 2 – $\omega = 10^{-2}$, 3 – $\omega = 10^{-3}$, 4 – $\omega = 0$ (постоянная сила). Штриховыми линиями показано функциональное поведение дисперсии

При амплитудах поля лежащих в областях II и III коэффициент диффузии, в отличие от области I, с понижением температуры возрастает до $D_{mx}(T_{mx})$. В температурном интервале $T > T_{mx}$, так же, как и для постоянной силы [22–23], кривые соответствующие периодическому полю можно аппроксимировать зависимостью $D \sim \exp(|\varepsilon_1|/kT)$, где ε_1 зависит от амплитуды поля. При $T < T_{mx}$ понижение температуры приводит к ослаблению диффузии. В области низких температур, кривые можно аппроксимировать зависимостью $D \sim \exp(-|\varepsilon_2|/kT)$, где ε_2 так же зависит от амплитуды поля. При этом максимум диффузии с ростом амплитуды смещается в область низких температур.

На рис. 5 приведено изменение коэффициента диффузии от обратной температуры для полей различной частоты при фиксированной амплитуде поля. Как видно из рисунка режим ТАД, в отличие от

случая постоянного поля, реализуется только в определенном интервале температур. Причем, чем ниже частота, тем шире температурный интервал. При любой конечной частоте существует температура,

ниже которой реализуется обычная температурная зависимость диффузии.

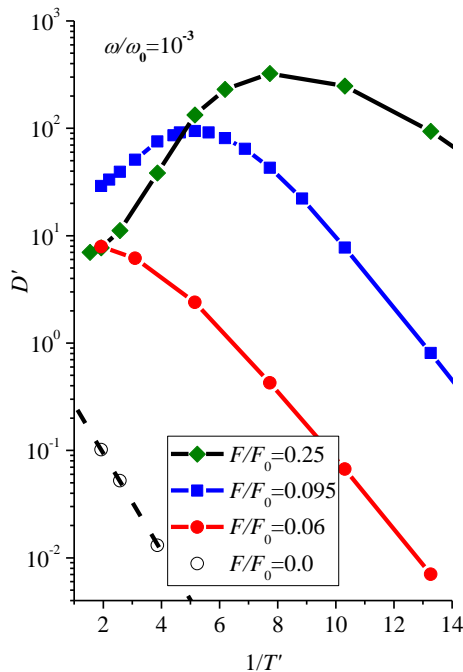


Рис. 4 – Зависимость коэффициента диффузии D от обратной температуры для различных амплитуд при фиксированной частоте внешнего поля $\omega = 10^{-3}$

Для качественного объяснения поведения диффузии с температурой при фиксированной частоте обратимся к графикам на рис. 6. Из рисунка видно, что в области **I** с повышением температуры время τ_1 уменьшается. При этом увеличивается длительность фазы супердиффузии $\tau_{spd} = \tau_2 - \tau_1$. То есть с повышением температуры коэффициент диффузии монотонно растет, что хорошо видно из рис. 4.

В области **II**, как следует из рис. 6, с повышением температуры время τ_1 так же уменьшается, как и в области **I**. Однако, в отличие от области **II**, τ_{spd} возрастает с понижением температуры. И соответственно время τ_2 (кривые 5–3) растет с понижением температуры. При температуре $T_{нк}(F, \omega)$ (равной 180 на данном рисунке) время τ_2 сравнивается с периодом внешних колебаний τ . При этом наблюдается максимальный коэффициент диффузии $D_{нк}$, соответствующий максимальной длительности фазы супердиффузии τ_{spd} . Область TAD заканчивается при достижении периода колебаний времени τ_2 . Дальнейшее уменьшение температуры (кривые 2–1) не приводит к возрастанию длительности τ_{spd} , так как оно ограничено периодом колебаний. С другой стороны, при уменьшении температуры по-прежнему возрастает τ_1 , уменьшая

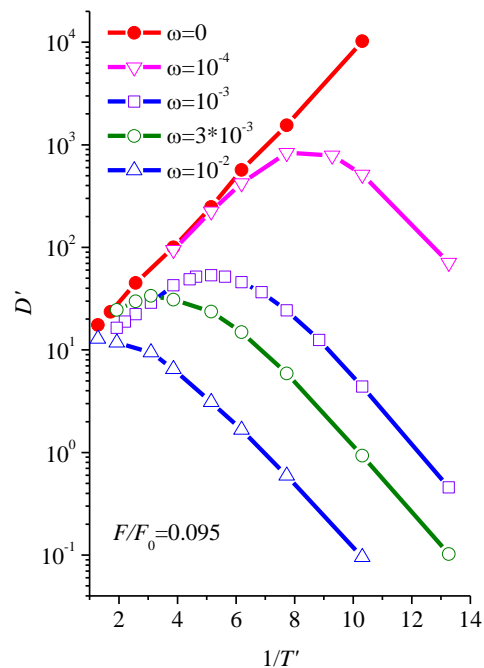


Рис. 5 – Зависимость коэффициента диффузии D от обратной температуры для различных частот внешнего поля при фиксированной амплитуде $F_0 / F_{cr} = 0.095$

время τ_{spd} . Таким образом, коэффициент диффузии начинает уменьшаться в соответствии с уменьшением τ_{spd} . Поскольку для постоянной силы $D \sim \exp(|\varepsilon|/kT)$ [22–23], то соответственно для температур $T > T_{нк}$ должна выполняться такая же зависимость. При $T < T_{нк}(F, \omega)$ диффузия ослабевает в соответствии с ростом τ_1 .

Как следует из рис. 6, для области **III** ситуация схожа с областью **II**. Максимальный коэффициент диффузии наблюдается при температуре $T_{нк}(F, \omega)$ соответствующей максимальной длительности фазы супердиффузии. В отличие от области **II**, переходная область от возрастания к падению диффузии будет более широкой за счет существования «бездисперсионной» (dispersionless) фазы. Это хорошо видно на кривой 4 на рис. 6.

Область TAD заканчивается при достижении времени τ_2 периода колебаний. С этой точки зрения для усиления диффузии предпочтительно использование внешних полей большой амплитуды, при которых за период колебаний максимально используется фаза супердиффузии до начала «бездисперсионной» фазы.

Исследование диффузии под воздействием внешнего ступенчатого периодического поля можно подытожить следующим образом.

Весь интервал амплитуд можно качественно разбить на три области: **I–III**. В области **I** диффузия монотонно усиливается с повышением температуры. Диффузия в областях **II– III** ведет себя иным образом: графики коэффициента диффузии представляют собой кривую с максимумом. При $T > T_{\text{max}}(F, \omega)$ реализуется

TAD: коэффициент диффузии растет с понижением температуры. При $T < T_{\text{max}}(F, \omega)$ D падает с уменьшением температуры. Существование TAD вызвано увеличением длительности фазы супердиффузии с понижением температуры.

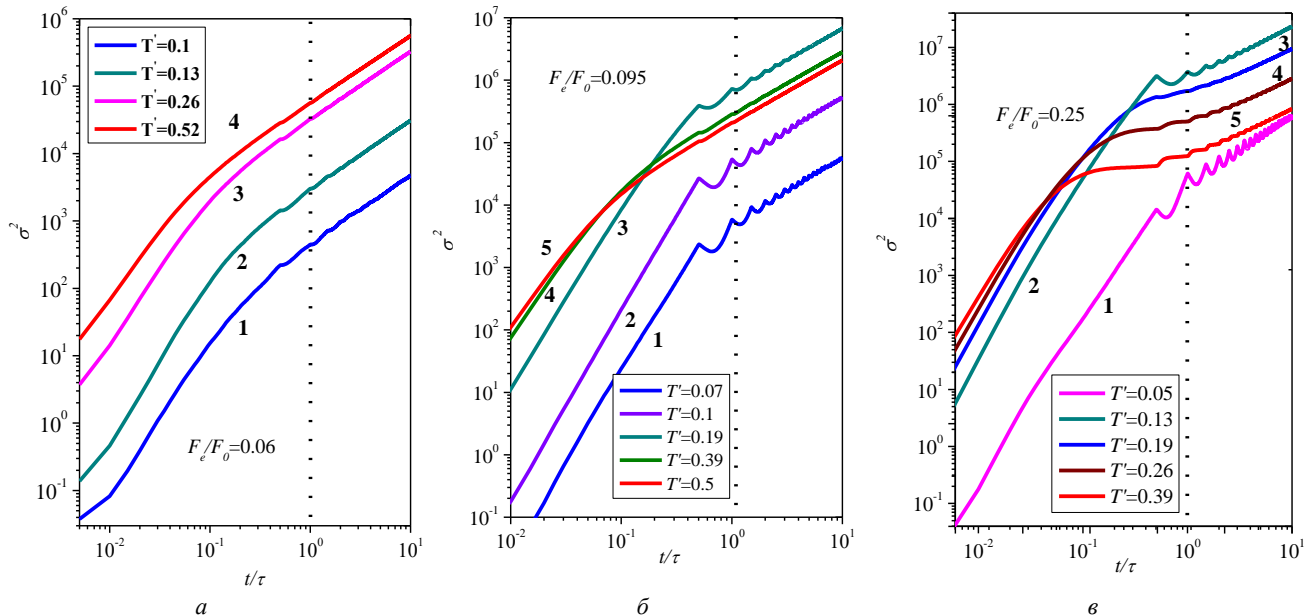


Рис. 6 – Зависимость безразмерной дисперсии частиц от времени для различных температур. Частота внешнего поля $\omega = 10^{-3}$. а – $F_0/F_{cr} = 0.06$, б – $F_0/F_{cr} = 0.095$, в – $F_0/F_{cr} = 0.25$

Выводы. В работе исследовано усиление диффузии в пространственно–периодических недодемпфированных системах внешними периодическими во времени полями. Показано, что диффузия может быть произвольным образом усилена (на многие порядки) при выборе соответствующих температур, амплитуд и частот внешнего поля.

Исследованы температурные зависимости усиления диффузии для различных амплитуд поля при фиксированной частоте внешнего поля. Показано, что при амплитудах превышающих критический уровень (области **II** и **III**), в температурной зависимости возникает TAD : обычная диффузия ($\sigma^2 \sim t$), но с коэффициентом диффузии, возрастающим с понижением температуры.

Физической причиной усиления диффузии под воздействием внешнего периодического поля является возникновение и существование на протяжении периода колебаний двух популяций частиц: локализованных и бегущих. При оптимальном выборе амплитуды осуществляются длинные прыжки бегущих частиц относительно локализованных, и происходит существенное увеличение коэффициента диффузии.

Будучи экспериментально установленным, эффект аномального усиления диффузии может быть использован в целом ряде новых технологий. Иссле-

дованное явление может использоваться для широкого круга систем, включающих сортировку частиц, создание поверхностных структур с заданными свойствами, проникновение частиц через искусственные и биологические мембраны, приборов с волнами зарядовой плотности, мемристоров и пр.

Список литературы

1. Costantini G. Threshold diffusion in a tilted washboard potential / G. Costantini, F. Marchesoni // Europhys. Lett. – 1999. – Vol. 48. – P. 491.
2. Hänggi P. Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale / P. Hänggi, F. Marchesoni // Rev. Mod. Phys. – 2009. – Vol. 81. – P. 337–442.
3. Risken H. The Fokker–Planck Equation and Methods of Solution and Applications / H. Risken. – Springer, 1989. – 413 p.
4. Sang–Hyuk L. // Giant Colloidal Diffusivity on Corrugated Optical Vortices / Sang–Hyuk L., Grier D. G. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol. 96. – P. 190601.
5. Tierno P. Giant Transversal Particle Diffusion in a Longitudinal Magnetic Ratchet / P. Tierno, P. Reimann, T. H. Johansen, F. Sagués // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 105. – P. 230602.
6. Eshuis P. Experimental Realization of a Rotational Ratchet in a Granular Gas / P. Eshuis, K. van der Weele, D. Lohse, D. J. van der Meer // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 104. – P. 248001–248005.
7. Sajeesh P. Particle separation and sorting in microfluidic devices: a review / P. Sajeesh, A. K. Sen // Microfluidics and Nanofluidics. – 2014. – Vol. 17 (1). – P. 1–52.
8. Risken H. Low friction nonlinear mobility for the diffusive motion in periodic potentials / H. Risken, H. D. Vollmer // Physics Letters. – 1979. – Vol. 69A (6). – P. 387–389.

9. Risken H. Brownian Motion in Periodic Potentials; Nonlinear Response to an External Force / H. Risken, H. D. Vollmer // *Z. Physik.* – 1979. – Vol. B 33. – P. 297–305.
10. Risken H. Bistability Effects of the Brownian Motion in Periodic Potentials / H. Risken, H. D. Vollmer // *Z. Physik.* – 1980. – Vol. B 37. – P. 343–349.
11. Risken H. Distribution Functions for the Brownian Motion of Particles in a Periodic Potential Driven by an External Force / H. Risken, H. D. Vollmer // *Z. Physik.* – 1979. – Vol. B 34. – P. 313–322.
12. Risken H. Nonlinear Response to an External Force / H. Risken, H. D. Vollmer // *Z. Physik.* – 1979. – Vol. B 35. – P. 177–184.
13. Jung P. Eigenvalues for the Extremely Underdamped Brownian Motion in an Inclined Periodic Potential / P. Jung, H. Risken // *Z. Physik.* – 1984. – Vol. B 54. – P. 357–370.
14. Costantini G. Threshold diffusion in a tilted washboard potential / G. Costantini, F. Marchesoni // *Europhys. Lett.* – 1999. – Vol. 48. – P. 491–497.
15. Borromeo M. Critical Hysteresis in a Tilted Washboard Potential / M. Borromeo, G. Costantini, F. Marchesoni // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 82. – P. 2820–2823.
16. Lindenberg K. Dispersionless Transport in a Washboard Potential / K. Lindenberg, J. M. Sancho, A. M. Lacasta, I. M. Sokolov // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 98. – P. 020602-020606.
17. Sancho J. M. Diffusion on a Solid Surface: Anomalous is Normal / J. M. Sancho, A. M. Lacasta, K. Lindenberg, I. M. Sokolov, A. H. Romero // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – P. 250601–250605.
18. Khoury M. Diffusion coefficient in periodic and random potentials / M. Khoury, J. P. Gleeson, J. M. Sancho, A. M. Lacasta, K. Lindenberg // *Phys. Rev.* – 2009. – Vol. E 80. – P. 021123–021131.
19. Lindenberg K. Transport and diffusion on crystalline surfaces under external forces / K. Lindenberg, A. M. Lacasta, J. M. Sancho, A. H. Romero // *New Journal of Physics.* – 2005. – Vol. 7. – P. 29–48.
20. Reimann P. Giant acceleration of free diffusion by use of tilted periodic potentials / P. Reimann, C. van den Broeck, H. Linke, P. Hänggi, J. M. Rubi, A. Pérez-Madrid // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 87. – P. 010602–010608.
21. Reimann P. Diffusion in tilted periodic potentials: Enhancement, universality, and scaling / P. Reimann, C. van den Broeck, H. Linke, P. Hänggi, J. M. Rubi, A. Pérez-Madrid // *Phys. Rev.* – 2002. – Vol. E65. – P. 031104-031120.
22. Marchenko I. G. Diffusion in the systems with low dissipation: Exponential growth with temperature drop / I. G. Marchenko, I. I. Marchenko // *Europhys. Lett.* – 2012. – Vol. 100. – P. 5005.
23. Marchenko I. G. Particle transport in space-periodic potentials in underdamped systems / I. G. Marchenko, I. I. Marchenko, A. V. Zhiglo // *European Physical Journal B.* – 2014. – Vol. 87. – P. 10–17.
24. Marchenko I. G. Anomalous temperature dependence of diffusion in crystals in time-periodic external fields / I. G. Marchenko, I. I. Marchenko // *JETP Letters.* – 2012. – Vol. 95 (3). – P. 137–142.
25. Speer D. Anisotropic diffusion in square lattice potentials: Giant enhancement and control / D. Speer, R. Eichhorn, P. Reimann // *Europhys. Lett.* – 2012. – Vol. 97. – P. 60004–60010.
26. Marchenko I. G. Abnormal surface diffusion of particles under the action of an external time-periodic force / I. G. Marchenko, I. I. Marchenko // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2014. – Vol. 514. – P. 012045–012050.
27. Кузнецов Д. Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения / Д. Ф. Кузнецов. – СПб: Санкт-Петербург, Из-во политех. ун-та. – 2007. – 800 с.
28. Lindner B. Critical Asymmetry for Giant Diffusion of Active Brownian Particles / B. Lindner, E. M. Nicola // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101. – P. 190603.
29. Siegle P. Origin of Hyperdiffusion in Generalized Brownian Motion / P. Siegle, I. Goychuk, P. Hänggi // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – P. 100602–100606.
30. Hänggi P., Marchesoni F. Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, vol. 81, pp. 337–442.
31. Risken H. *The Fokker–Planck Equation and Methods of Solution and Applications.* London, Springer Publ., 1989. 413 p.
32. Sang-Hyuk L., Grier D. G. Giant Colloidal Diffusivity on Corrugated Optical Vortices. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, pp. 190601.
33. Tierno P., Reimann P., Johansen T. H., Sagués F. Giant Transversal Particle Diffusion in a Longitudinal Magnetic Ratchet. *Phys. Rev. Lett.* 2010, vol. 105, pp. 230602.
34. Eshuis P., Van der Weele K., Lohse D., Van der Meer D. j Experimental Realization of a Rotational Ratchet in a Granular Gas. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, pp. 248001–248005.
35. Sajeesh P., Sen A. K. Particle separation and sorting in microfluidic devices: a review. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 1–52.
36. Risken H., Vollmer H. D. Low friction nonlinear mobility for the diffusive motion in periodic potentials. *Phys. Lett.*, 1979, vol. 69A, no. 6, pp. 387–389.
37. Risken H., Vollmer H. D. Brownian Motion in Periodic Potentials; Nonlinear Response to an External Force. *Z. Physik.*, 1979, vol. B 33, pp. 297–305.
38. Risken H., Vollmer H. D. Bistability Effects of the Brownian Motion in Periodic Potentials. *Z. Physik.*, 1980, vol. B 37, pp. 343–349.
39. Risken H., Vollmer H. D. Distribution Functions for the Brownian Motion of Particles in a Periodic Potential Driven by an External Force. *Z. Physik.*, 1979, vol. B 34, pp. 313–322.
40. Risken H., Vollmer H. D. Nonlinear Response to an External Force. *Z. Physik.*, 1979, vol. B 35, pp. 177–184.
41. Jung P., Risken H., Eigenvalues for the Extremely Underdamped Brownian Motion in an Inclined Periodic Potential. *Z. Physik.*, 1984, vol. B 54, pp. 357–370.
42. Costantini G., Marchesoni F. Threshold diffusion in a tilted washboard potential. *Europhys. Lett.*, 1999, vol. 48, pp. 491–497.
43. Borromeo M., Costantini G., Marchesoni F. Critical Hysteresis in a Tilted Washboard Potential. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, vol. 82, pp. 2820–2823.
44. Lindenberg K., Sancho J. M., Lacasta A. M., Sokolov I. M. Dispersionless Transport in a Washboard Potential. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 98, pp. 020602-020606.
45. Sancho J. M., Lacasta A. M., Lindenberg K., Sokolov I. M., Romero A. H. Diffusion on a Solid Surface: Anomalous is Normal. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 92, pp. 250601–250605.
46. Khoury M., Gleeson J. P., Sancho J. M., Lacasta A. M., Lindenberg K. Diffusion coefficient in periodic and random potentials. *Phys. Rev.*, 2009, vol. E 80, pp. 021123–021131.
47. Lindenberg K., Lacasta A. M., Sancho J. M., Romero A. H. Transport and diffusion on crystalline surfaces under external forces. *New Journal of Physics*, 2005, vol. 7, pp. 29–48.
48. Reimann P., Van den Broeck C., Linke H., Hänggi P., Rubi J. M., Pérez-Madrid A. Giant acceleration of free diffusion by use of tilted periodic potentials. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, pp. 010602–010606.
49. Reimann P., Van den Broeck C., Linke H., Hänggi P., Rubi J. M., Pérez-Madrid A. Diffusion in tilted periodic potentials: Enhancement, universality, and scaling. *Phys. Rev.*, 2002, vol. E65, pp. 031104–031120.
50. Marchenko I. G., Marchenko I. I. Diffusion in the systems with low dissipation: Exponential growth with temperature drop. *Europhys. Lett.*, 2012, vol. 100. – P. 5005.
51. Marchenko I. G., Marchenko I. I., Zhiglo A. V. Particle transport in space-periodic potentials in underdamped systems. *European Physical Journal B*, 2014, vol. 87, pp. 10–17.
52. Marchenko I. G., Marchenko I. I. Anomalous temperature dependence of diffusion in crystals in time-periodic external fields. *JETP Letters*, 2012, vol. 95, no. 3, pp. 137–142.
53. Speer D., Eichhorn R., Reimann P. Anisotropic diffusion in square lattice potentials: Giant enhancement and control. *Europhys. Lett.*, 2012, vol. 97, pp. 60004–60010.
54. Marchenko I. G., Marchenko I. I. Abnormal surface diffusion of particles under the action of an external time-periodic force. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 514, pp. 012045–012050.
55. Kuznetsov D. F. *Stokhasticheskiye differentsyalnye uravneniya: teoriya y praktika chyslennoho resheniya* [Stochastic differential

References (transliterated)

1. Costantini G., Marchesoni F. Threshold diffusion in a tilted washboard potential. *Europhys. Lett.*, 1999, no. 48, pp. 491.

- equations: theory and practice of numerical solution]. Sankt-Petersburg, Polytech. Univer. Publ., 2007. 800 p.
28. Lindner B., Nicola E. M. Critical Asymmetry for Giant Diffusion of Active Brownian Particles. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, pp. 190603.
29. Siegle P., Goychuk I., Hanggi P. Origin of Hyperdiffusion in Generalized Brownian Motion. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 105, pp. 100602–100606.

Поступила (received) 09.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Температурно-аномальна дифузія у недодемпфованих періодичних системах / І. І. Марченко, А. В. Жигло, І. Г. Марченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 9–17. – Бібліогр.: 29 назв. – ISSN 2079–0023.

Температурно-аномальная диффузия в недодемпфированных периодических системах / И. И. Марченко, А. В. Жигло, И. Г. Марченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 9–17. – Библиогр.: 29 назв. – ISSN 2079–0023.

Temperature-abnormal diffusion in underdamped systems / I. I. Marchenko, A. V. Zhiglo, I. G. Marchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 9–17. – Bibliogr.: 29. – ISSN 2079–0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Марченко Ігор Іванович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Системного аналізу і управління, тел.: +380 (57) 707–60–38; e-mail: igor.marchenko@hotmail.com.

Марченко Игорь Иванович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Системного анализа и управления, тел.: +380 (57) 707–60–38; e-mail: igor.marchenko@hotmail.com.

Marchenko Igor Ivanovych – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the System Analysis and Control Department; tel.: +380 (57) 707–60–38; e-mail: igor.marchenko@hotmail.com.

Жигло Андрій Валентинович – кандидат фізико-математичних наук, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», науковий співробітник, тел.: +380(57) 335 65 36; e-mail: azhiglo@gmail.com.

Жигло Андрей Валентинович – кандидат физико-математических наук, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», научный сотрудник, тел.: +380(57) 335 65 36; e-mail: azhiglo@gmail.com.

Zhiglo Andrii Valentynovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology", researcher, tel.: +380(57) 335 65 36; e-mail: azhiglo@gmail.com.

Марченко Іван Григорович – доктор фізико-математичних наук, професор, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», провідний науковий співробітник, тел.: +380(57) 335–64–71; e-mail: march@kipt.kharkov.ua.

Марченко Иван Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», ведущий научный сотрудник, тел.: +380(57) 335–64–71; e-mail: march@kipt.kharkov.ua.

Marchenko Ivan Grigorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology", leading scientist; tel.: +380(57) 335–64–71; e-mail: march@kipt.kharkov.ua.

И. И. БОРОДАЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ИОНОВ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНЫ КЛЕТОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Розглянуто можливість впливу на процес перенесення іонів через мембрани рослинних клітин, що визначає інтенсивність їх дихання і тривалість зберігання, за допомогою зовнішніх надвисокочастотних електромагнітних полів. З цією метою отримано вирази для цих полів всередині клітин. Рух іонів крізь канали в мембранах представлено як однорядний потік, який може гальмуватися потенційними бар'єрами, що створені іонами, які не вийшли з каналів. За допомогою системи рівнянь Колмогорова, які описують розглянутий Марківський процес, отримані імовірнісні характеристики вільного й уповільненого перенесення іонів.

Ключові слова: мембрана, рух іонів, потенційний бар'єр, електромагнітне поле, ймовірність, Марківський процес.

Рассмотрена возможность влияния на процесс переноса ионов через мембраны растительных клеток, что определяет интенсивность их дыхания и длительность хранения, с помощью внешних сверхвысокочастотных электромагнитных полей. С этой целью получены выражения для этих полей внутри клеток. Движение ионов сквозь каналы в мембранах представлено как однорядный поток, который может тормозиться потенциальными барьерами, создаваемыми не вышедшими из каналов ионами. С помощью системы уравнений Колмогорова, которые описывают рассматриваемый Марковский процесс, получены вероятностные характеристики свободного и замедленного переноса ионов.

Ключевые слова: мембрана, движение ионов, потенциальный барьер, электромагнитное поле, вероятность, Марковский процесс.

The article describes the possibility of influencing the process of transport of ions through the membranes of plant cells using external microwave electromagnetic fields, which determines the intensity of their breath and duration of storage. To this end, expressions are obtained for these fields within the cells. The movements of ions through channels in the membranes of single-row represented as a stream, which can be inhibited by the potential barriers produced by not go out of the channel ions. With the help of the Kolmogorov equations, which describe the considered Markov process, we obtained the probability characteristics of a free and slow ion transport. The presence in the room where you store the fruit, the external electromagnetic field microwave with found parameters' increases the probability of a possible lock-ion channel movement almost seven times.

Keywords: membrane, ion motion, potential barrier, electromagnetic field, probability, Markov process.

Введення. Важнейшим фактором длительного хранения фруктов является уровень интенсивности их клеточного дыхания. Этот окислительный распад органических веществ сопровождается образованием химически активных метаболитов и освобождением энергии, которая используется клетками для процессов жизнедеятельности. Процесс дыхания, в каком-то смысле, аналогичен процессу горения – и в том и другом случаях выделяется теплота. В обоих процессах происходит присоединение кислорода к субстрату, поэтому дыхание есть медленно текущее горение питательных веществ в живом организме. Естественно, что возрастание функциональной активности клеток сопровождается усилением дыхания. В значительной степени это достигается благодаря механизму дыхательного контроля [1].

Сказанное выше говорит о том, что цель длительной сохранности плодов растений может быть достигнута с помощью замедления транспорта ионов и протонов через мембрану растительной клетки. Обычно данная задача решается с помощью создания соответствующего температурного режима в хранилище либо с помощью использования в нем смеси нейтральных газов, тормозящих данный процесс, либо одновременного применения того и другого.

Принципиально другим способом решения этой задачи может быть создание соответствующих электрических полей, противодействующих указанному транспорту, либо закрытию каналов, по которым этот транспорт осуществляется [2]. Очевидно, что замедление процесса дыхания, а, следовательно, увеличение срока хранения фруктов может быть достигнуто за счет уменьшения проницаемости мембран митохондрий. Этого можно достигнуть,

уменьшая величину тока наружу и внутрь клетки, чему может способствовать именно высокочастотное электромагнитное воздействие на плод.

Постановка задачи. Для простоты растительная клетка рассматривается в виде объекта, имеющего сферическую форму. Выяснено, как зависит внутреннее поле в таких объектах от амплитуды падающей плоской волны. Для получения выражений, позволяющих найти зависимость внутренних полей в таких объектах от амплитуды падающей плоской волны, предполагается, что среда, заполняющая внутреннюю часть сферы, характеризуется диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ и μ , которые, при наличии неоднородности, могут являться функциями радиуса сферы. Внешнее по отношению к рассеивателю пространство предполагается однородным. Оно характеризуется постоянными электромагнитными проницаемостями ϵ_1 и μ_1 . Если окружающая среда воздух, то $\epsilon_1 \approx \epsilon_0 = (36\pi)^{-1} \cdot 10^{-9}$ Ф/м. Поскольку рассматриваются биологические объекты, то везде в дальнейшем $\mu = \mu_1 \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Так как на процесс движения ионов через мембрану влияет электрическая составляющая поля, найдены ее компоненты [3]:

$$E_r = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2}} E_0 b_1 \frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{(kr)^{\frac{3}{2}}} \sin \theta \cos \phi, \quad (1)$$

$$E_\phi = -j \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr) \cos \theta \sin \phi - \right.$$

$$-j \frac{b_1}{2} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr) \right) \right] \sin \phi, \quad (2)$$

$$E_0 = j \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{\pi}{kr}} \left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr) \cos \phi - \right.$$

$$\left. -j \frac{b_1}{2} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr) \right) \right] \cos \theta \cos \phi \right). \quad (3)$$

Учитывая выражения (1)–(3) получена амплитуда электрического поля, влияющего на скорость и интенсивность движения ионов через мембрану митохондрий:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\phi|^2 + |E_0|^2}. \quad (4)$$

Методы исследований. Мембрана не является однородной фазой для движения ионов, поскольку перенос ионов через мембраны осуществляется через специализированные участки – ионные каналы, представляющие собой липопротеиновые комплексы сложной структуры. В узких каналах невозможна независимая диффузия, а допустимо только однорядное движение ионов. Вследствие узости поры в канале могут происходить сильные ион-ионные взаимодействия.

Различия в поверхностных потенциалах на концах поры могут привести и к различным значениям коэффициента распределения. Возможно также увеличение количества локальных неоднородностей электрического поля, связанных с зарядами белковой молекулы, образующей канал. Следовательно, существуют явления, которые нельзя объяснить в рамках представлений о свободной диффузии, – это взаимодействие потоков, а также блокировка канала при высоких концентрациях электролита или интенсивном движении ионов сквозь канал.

Естественно предположить, что повышение скорости движения ионов через канал, вызванное увеличением силы внутриклеточного тока, будет иметь последствия, аналогичные повышению концентрации электролита в цитоплазме фруктов. Ионы, находящиеся в канале, не будут успевать проходить через энергетические барьеры, существующие при входе и выходе из мембраны, а также через барьер внутри канала, что будет тормозить процесс их движения [4].

Особенности взаимодействия иона с молекулярными группами канала учитываются соответствующими профилями потенциальной энергии иона в канале, который представляется рядом последовательных потенциальных ям и барьеров. При движении через канал ион достаточно долго (по сравнению со временем тепловых колебаний) задерживается в каждой потенциальной яме. Перескок возможен только в пустую яму. Второй ион не может попасть в занятую потенциальную яму из-за электростатического взаимодействия с уже находящимся там ионом.

Наиболее простым и достаточно общим оказыва-

ется случай, когда в мембране существует всего три кинетических барьера. Боковые барьеры соответствуют входным участкам канала, где происходит первичный процесс дегидратации, центральный барьер играет роль селективного фильтра (рис. 1).

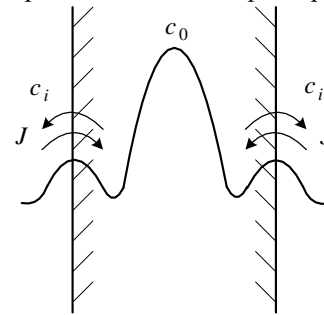


Рис. 1 – Энергетический профиль модели канала: c_i – концентрация ионов в окружающем растворе; c_0 – концентрация ионов внутри мембраны; J – интенсивность потока ионов внутрь и наружу мембраны.

В теории постоянного поля проводимость мембраны, находящейся в симметричном ионном окружении, должна линейно возрастать с повышением концентрации электролита. При высоких концентрациях ионов входной и выходной участки ионного канала мембраны меняют свои состояния не только в процессе самого транспорта через канал, но и за счет взаимодействия с омывающими растворами. Таким образом, скорость транспорта в канале будет зависеть от вероятности заполнения ионами участков связывания на границах мембраны, что может приводить к заполнению обоих мест связывания и блокировке канала при высоких концентрациях электролита или при повышении интенсивности перемещения ионов под воздействием внешнего сверхвысокочастотного электромагнитного поля.

Рассматриваемый нами канал с двумя участками связывания может находиться в четырех состояниях, между которыми возможны переходы. Состояние 1 – левый участок занят, а правый свободен (1 0); состояние 2 – правый участок занят, а левый свободен (0 1); состояние 3 – оба участка заняты (1 1); состояние 4 – оба участка свободны (0 0). Для описания данных четырех состояний, а также возможных переходов между ними воспользуемся теорией Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем [5].

Введем в рассмотрение вероятности нахождения канала в отдельных состояниях, т. е. в состояниях (1 0); (0 1); (1 1); (0 0). Проводимость канала будет зависеть от вероятности нахождения канала в состояниях (1 0) и (0 1), поскольку суммарная интенсивность потока определяется выражением

$$J_\Sigma = J_1 p_1(1\ 0) - J_2 p_2(0\ 1), \quad (5)$$

где $p_1(1\ 0)$ и $p_2(0\ 1)$ – вероятности состояний (1 0) и (0 1) соответственно;

J_1 и J_2 – интенсивности перехода ионов через центральный барьер наружу и внутрь соответственно.

Чтобы определить вероятности $p_1(1\ 0)$, $p_2(0\ 1)$, а также $p_3(1\ 1)$ и $p_4(0\ 0)$ рассмотрен Марковский процесс в виде следующего графа (рис. 2):

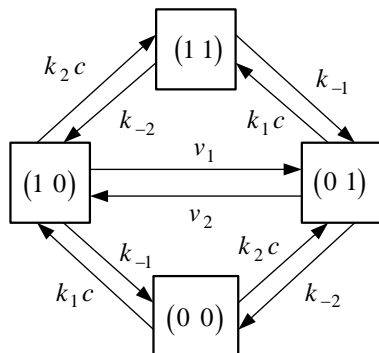


Рис. 2 – Марковский процесс переходов между отдельными состояниями для трехбарьерного канала

На рис. 2 k_1 , k_2 , k_{-1} , k_{-2} – константы, характеризующие интенсивность процесса преодоления одним ионом бокового барьера в прямом и обратном направлении. При движении ионов внутрь мембраны учет их концентрации снаружи и внутри клетки учитывается умножением соответствующей константы на концентрацию c .

Как известно [5], вероятности состояний Марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем можно вычислить с помощью нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова [6]:

$$\begin{aligned} \frac{d p_1}{d t} &= J_2 e^{\psi \varphi_2} p_2 + k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} p_3 + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} p_4 - \\ &\quad - \left(J_1 e^{-\psi \varphi_2} + k_1 c e^{\psi \varphi_3} + k_{-2} e^{\psi \varphi_1} \right) p_1; \\ \frac{d p_2}{d t} &= J_1 e^{-\psi \varphi_2} p_1 + k_{-1} e^{\psi \varphi_1} p_3 + k_2 c e^{\psi \varphi_3} p_4 - \\ &\quad - \left(J_2 e^{\psi \varphi_2} + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} + k_{-2} c e^{-\psi \varphi_3} \right) p_2; \\ \frac{d p_3}{d t} &= k_2 c e^{\psi \varphi_3} p_1 + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} p_2 - \\ &\quad - \left(k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} + k_{-1} e^{\psi \varphi_1} \right) p_3; \\ \frac{d p_4}{d t} &= k_{-1} e^{\psi \varphi_1} p_1 + k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} p_2 - \\ &\quad - \left(k_1 c e^{-\psi \varphi_1} + k_2 c e^{\psi \varphi_3} \right) p_4, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\psi = \frac{z F}{2 R T}$;

- z – валентность иона;
- T – абсолютная температура;
- R – газовая постоянная;
- F – число Фарадея.

Решение системы (6) проводится с использованием начальных условий $p_1(0)$, $p_2(0)$, $p_3(0)$,

$p_4(0)$. Поскольку процесс дыхания плодов фруктов, то есть процесс перемещения ионов электролита внутренней среды через каналы в мембранах митохондрий может начаться из любого первоначального состояния, решение системы уравнений Колмогорова получено в предположении начальных условий $p_4(0) = 1$, остальные начальные условия равны нулю.

На основании выражений (6) был проведен численный анализ процесса переноса ионов через мембрану клетки при отсутствии и наличии внешнего электромагнитного поля. Расчет проводился с учетом возможности частичной и полной блокировки канала, по которому происходит движение ионов.

Вначале система уравнений Колмогорова (6) была решена для случая, когда движение ионов через мембрану и процесс дыхания осуществляется под воздействием естественного электрохимического потенциала в отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля.

Полученные результаты показали, что примерно через 1 с. после начала процесса дыхания в отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля система переходит в стационарное состояние. При этом она с вероятностью порядка 0,3 будет находиться или в состоянии (1 0) или (0 1). Иначе говоря, с вероятностью порядка 0,6 будет занят только один выход из канала движения ионов. Вероятность состояния (0 0) (оба выхода из канала дыхания свободны) становится также порядка 0,3. Следовательно, это свидетельствует о низкой вероятности отсутствия перемещения ионов по каналу в обе стороны, если на них воздействует только электрохимический потенциал клетки, а в самом канале для них нет препятствий. Открытое состояние одного из концов канала позволяет беспрепятственно перемещаться иону сквозь канал и выходить из него наружу. Данный результат говорит о том, что процесс дыхания с большой вероятностью порядка 0,9 проходит без блокировки.

При наложении на мембраны клетки внешнего электромагнитного поля с частотой 33,5...36 ГГц и искусственно создаваемого потенциала на мембране величиной 120 мВ ситуация принципиально меняется.

В данном случае вероятности p_1 или p_2 состояний (1 0) или (0 1) со временем становятся порядка 0,1, то есть в сумме порядка 0,2. Вероятность состояния (0 0), когда канал открыт с обоих концов, меньше 0,1. Таким образом, суммарная вероятность свободного движения ионов по каналам равна примерно 0,3. В то же время вероятность блокировки каналов, то есть вероятность p_3 состояния (1 1), возрастает до 0,7. Следовательно, при наложении на хранящиеся фрукты внешнего электромагнитного поля СВЧ диапазона с указанными выше параметрами вероятность возможной блокировки каналов движения ионов возрастает практически в семь раз. Соответственно в семь раз будет замедляться и обмен веществ на уровне мембран клетки и процесс их дыхания, что естественно скажется на сроках хранения фруктов.

Выводы. Интенсивность дыхания и, следовательно, длительность сохранности фруктов зависит от

того, насколько активно происходит перенос ионов и протонов через мембрану митохондрий. Возможность регуляции этого переноса, а именно его торможение, должно привести к большим срокам хранения фруктов без существенной потери их свойств.

При наложении сверхвысокочастотного электромагнитного поля концентрация токопереносящих ионов в мембране повышается, что приводит соответственно к повышению их взаимодействия и возможному запираанию канала.

Скорость транспорта в канале зависит от вероятности заполнения ионами участков связывания на границах мембраны, что может приводить к заполнению обоих мест связывания и блокировке канала при повышении интенсивности перемещения ионов под воздействием внешнего ЭМП СВЧ.

В отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля система переходит в стационарное состояние. При этом процесс дыхания с большей вероятностью порядка 0,9 проходит без блокировки.

При наложении внешнего искусственного ЭМП СВЧ оптимальными для максимальной блокировки движения ионов через каналы в мембране клетки являются частота поля 33,5...36 ГГц, а искусственно создаваемый потенциал на мембране – 120 мВ.

Наличие в помещении, где хранятся фрукты, внешнего электромагнитного поля СВЧ диапазона с указанными выше параметрами повышает вероятность возможной блокировки каналов движения ионов

практически в семь раз

Список литературы

1. *Медведев С. С.* Электрофизиология растений: учебное пособие / С. С. Медведев. – СПб. : Изд-во С.-Петербургского университета, 2012. – 122 с.
2. Проблемы регуляции в биологических системах. Биофизические аспекты / ред. А.Б.Рубин.- М. : Институт компьютерных исследований, 2007. - 480 с.
3. *Бинги В. И.* Магнитобиология. Эксперименты и модели / В. И. Бинги. М. : Милта, 2002. 592 с.
4. *Антонов В. Ф.* Биофизика. / В. Ф. Антонов. – М. : Владос, 2000. – 288 с.
5. *Булинский А. В., Ширяев А. Н.* Теория случайных процессов. / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – М. : Физматлит, 2005. – 408 с.

References (transliterated)

1. Medvedev S. S. *Elektrofiziologiya rasteniy: uchebnoe posobyie* [Plant electrophysiology: tutorial]. Saint Petersburg, St. Petersburg University Publ., 1997. 122 p.
2. Rubin A. B., ed. *Problemy regulatsii v biologicheskikh sistemakh. Biofizicheskie aspekty* [Problems in the regulation of biological systems. Biophysical aspects]. Moscow, Institute of Computer Science Publ., 2007. 480 p.
3. Bingi V. I. *Magnitobiologiya. Eksperimenty I modeli* [Magnetobiology. The experiments and models]. Moscow. Milta Publ., 2002. 592 p.
4. Antonov V. F. *Biofizika* [Biophysics]. Moscow, Vlados Publ., 2000. 288 p.
5. Bulinskiy A. V., Shyryaev A. N. *Teoriya sluchainykh protsessov* [The theory of stochastic processes]. Moscow, Physmatlit Publ., 2005. 408 p.

Поступила (received) 01.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання процесу переносу іонів крізь мембрани клітин під впливом зовнішнього електромагнітного поля / І. І. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 18–21. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Моделирование процесса переноса ионов через мембраны клеток под воздействием внешнего электромагнитного поля / И. И. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 18–21. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Modeling of transfer ions across cell membranes by an external electromagnetic field / I. I. Borodai // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 18–21. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бородай Ірина Іванівна – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, аспірант кафедри технотроніки і теоретичної електротехніки; тел.:(067) 707–39–88; e-mail: pirel@ukr.net.

Бородай Ірина Іванівна – Харьковський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, аспірант кафедри технотроніки і теоретичної електротехніки; тел.:(067) 707-39-88; e-mail: pirel@ukr.net.

Borodai Iryna Ivanivna – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, graduate student at the Department of technotronics and theoretical engineering; tel.: (067) 707-39-88; e-mail: pirel@ukr.net.

А. С. ДОВБИШ, Ю. В. СИМОНОВСЬКИЙ, О. В. КОРОБЧЕНКО, М. А. ЛЕТЮГА

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Розглядається в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології аналізу даних, що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи в процесі її навчання, метод інформаційного синтезу геоінформаційної системи розпізнавання об'єктів на місцевості. Метою статті є підвищення функціональної ефективності геоінформаційної системи розпізнавання транспортного засобу на автомагістралі, обладнаній стаціонарною відеокамерою. Реалізовано інформаційно-екстремальний алгоритм машинного навчання системи розпізнавання із оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Як критерій функціональної ефективності машинного навчання використано інформаційну міру Шеннона, яка є функціоналом точнісних характеристик класифікаційних рішень, що приймаються на кожному кроці навчання. Запропонований алгоритм машинного навчання реалізовано на прикладі розпізнавання автомобіля на автомагістралі.

Ключові слова: геоінформаційна система, інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія, розпізнавання, машинне навчання, навчальна матриця, функціональна ефективність.

Рассматривается в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии анализ данных, основанный на максимизации информационной способности системы в процессе ее обучения, метод информационного синтеза геоинформационной системы распознавания объектов на местности. Целью статьи является повышение функциональной эффективности геоинформационной системы распознавания транспортного средства на автомагистрали, оборудованной стационарной видеокамерой. Реализовано информационно-экстремальный алгоритм машинного обучения системы распознавания с оптимизацией контрольных допусков на признаки распознавания. В качестве критерия функциональной эффективности машинного обучения использовано информационную меру Шеннона, которая является функционалом точностных характеристик классификационных решений, принимаемых на каждом шаге обучения. Предложенный алгоритм машинного обучения реализовано на примере распознавания автомобиля на автомагистрали.

Ключевые слова: геоинформационная система, информационно-экстремальная интеллектуальная технология, распознавание, транспортный засіб, навчальна матриця, машинне навчання, функціональна ефективність.

Considered in the framework of information and extreme intellectual technology of data analysis based on maximizing the ability of information systems in the process of learning, the method of synthesis of geoinformation information Object recognition systems on the terrain. The aim of the article is to improve the operational efficiency of geoinformation vehicle recognition system on the highways, equipped stationary video camera. Implemented information and extreme recognition algorithm of machine learning system with optimization of the control tolerances for recognition attributes. As a criterion for the functional efficiency of machine learning to use information measure Shannon, which is a functional classification accuracy characteristics of decisions taken at each stage of learning. The proposed algorithm of machine learning is implemented on the vehicle detection example on the motorway.

Keywords: geographic information systems, information and extreme intelligent technologies, recognition, vehicle, training matrix, machine learning, functional efficiency.

Вступ. Розпізнавання об'єктів на місцевості є актуальною задачею для багатьох галузей соціально-економічної сфери суспільства, де застосовуються геоінформаційні системи. Однією із задач геоінформаційної системи, яка має важливе практичне значення, є розпізнавання транспортного засобу на місцевості в процесі його відеоспостереження. Складність розв'язання цієї задачі обумовлена в першу чергу науково-методологічними причинами, що не дозволяють забезпечити високу функціональну ефективність існуючих методів інтелектуального аналізу даних за довільних умов формування зображень об'єктів на місцевості, суттєвого перетину класів розпізнавання в просторі ознак, впливу неконтрольованих збурюючих факторів тощо. Недосконалість існуючих класифікаторів, побудованих на відомих методах технології Data Mining, включаючи нейронні та імунні мережі [1, 2], обумовила необхідність застосування глибокого навчання, яке спрямовано на оброблення і розвідувальний аналіз вхідних зображень з метою формування інформативного словника ознак розпізнавання, що дозволяє користуватися системами розпізнавання, побудованими на дистанційних критеріях близькості [3]. Але такий підхід суттєво підвищує обчислювальну трудомісткість алгоритмів функціонування геоінформаційної системи розпізнавання і цим зменшує її надійність і оперативність прийняття рі-

шень безпосередньо в робочому режимі. Крім того, застосування дистанційних критеріїв близькості не забезпечує високої достовірності розпізнавання об'єктів через перетин класів розпізнавання, що має місце в практичних задачах.

Одним із перспективних напрямків підвищення функціональної ефективності геоінформаційних систем розпізнавання є застосування ідей і методів так званої інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології) аналізу даних, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи в процесі її машинного навчання [4, 5]. Як відомо, основна ідея інформаційно-екстремальних методів машинного навчання полягає в адаптації вхідного математичного опису системи розпізнавання шляхом допустимих його перетворень в просторі Хеммінга до максимальної повної ймовірності прийняття правильних рішень безпосередньо в робочому режимі. При цьому оптимізація параметрів навчання здійснюється шляхом цілеспрямованого пошуку глобального максимуму інформаційного критерію в робочій (допустимій) області визначення його функції.

В статті розглядається інформаційно-екстремальний алгоритм машинного навчання геоінформаційної системи розпізнавання транспортного засобу, що рухається по автомагістралі.

Постановка задачі. Розглянемо формалізовану

постановку задачі інформаційного синтезу здатної навчатися геоінформаційної системи розпізнавання об'єктів на місцевості, які складають алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^o | m = \overline{1, M}\}$. При цьому кожний клас розпізнавання характеризує конкретний транспортний засіб. Нехай за результатами відеоспостережень конкретно визначених об'єктів сформована навчальна матриця $\|y_{m,i}^{(j)}\|$, елементами якої є значення яскравості пікселів рецепторного поля їх зображень. У матриці рядок є реалізацією образу $\{y_{m,i}^{(j)} | i = \overline{1, N}\}$, де N – кількість ознак розпізнавання, а стовпець матриці – випадкова навчальна вибірка $\{y_{m,i}^{(j)} | j = \overline{1, n}\}$ з обсягом n . Крім того, задано структурований вектор параметрів функціонування

$$g = \langle g_1, \dots, g_\xi, \dots, g_\Xi \rangle, \quad (1)$$

які впливають на функціональну ефективність системи розпізнавання, з відповідними на них обмеженнями.

Необхідно в процесі машинного навчання системи розпізнавання визначити оптимальні значення параметрів функціонування вектора (1), які забезпечують максимальне значення критерію функціональної ефективності (КФЕ) в робочій (допустимій) області визначення його функції:

$$\bar{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{\{k\} \in G} E_m^{(k)}, \quad (2)$$

де $E_m^{(k)}$ – значення інформаційного КФЕ навчання системи розпізнавати реалізації класу X_m^o , обчислене на k -му кроці навчання; $\{k\}$ – впорядкована множина кроків навчання; G_E – область допустимих значень функції інформаційного КФЕ навчання системи.

На етапі екзамену, тобто безпосередньо в режимі розпізнавання, необхідно прийняти з високою достовірністю рішення про належність реалізації об'єкту, що спостерігається стаціонарною відеокамерою, розташованою на автомагістралі, до одного із класів сформованого на етапі навчання алфавіту.

Таким чином, постановка задачі не передбачає проведення на етапі розвідувального аналізу процедур, пов'язаних із глибоким навчанням, основними задачами якого є стиснення інформації та формування інформативного словника ознак розпізнавання. При цьому в статті акцент зроблено на побудові вирішальних правил, здатних з високою повною ймовірністю приймати класифікаційні рішення за довільних умов формування зображень об'єктів, що розпізнаються, і суттєвого перетину в просторі ознак класів розпізнавання, що обумовлюють апріорну невизначеність вхідних даних.

Математична модель. В рамках ІЕІ-технології категорійна модель здатної навчатися системи розпізнавання як символічних образів, так і безпосередньо зображень будується у вигляді узагальненого орієнтованого графу, в якому атрибутами є множини, які застосовуються при функціонуванні системи в режимах

машинного навчання і екзамену, а ребрами – відповідні оператори відображення цих множин [4]. Як відомо побудова таких категорійних моделей є необхідною умовою функціонального програмування, що стрімко виходить на існуючий ринок інформаційних технологій, для створення інформаційного, алгоритмічного і програмного забезпечення інтелектуальних систем.

Оскільки основною задачею машинного навчання є побудова вирішальних правил, які дозволяють в режимі екзамену приймати високо достовірні класифікаційні рішення, то категорійна модель повинна бути орієнтована на конкретний тип вирішальних правил. Як відомо в рамках ІЕІ-технології вирішальні правила відносяться до класу радіально базисних в просторі ознак розпізнавання. Така їх редукція дозволяє на етапі екзамену, тобто безпосередньо в робочому режимі системи розпізнавання приймати класифікаційні рішення в реальному темпі часу. З метою спрощення далі будемо розглядати вирішальні правила, які задаються геометричними параметрами гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, оптимізація яких за інформаційним критерієм здійснюється на етапі машинного навчання системи розпізнавання.

Розглянемо категорійну модель інформаційно-екстремального навчання системи розпізнавання зображень з оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Обов'язковою складовою категорійної моделі є вхідний математичний опис системи розпізнавання, який подамо у вигляді структури

$$\Delta_B = \langle G, T, Z, \Omega, Y, X; \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \rangle,$$

де G – простір вхідних сигналів (факторів); T – множина моментів часу зняття інформації; Ω – простір ознак розпізнавання; Z – простір можливих станів; Y – вибіркова множина – вхідна навчальна матриця яскравості, елементи якої звичайно задаються в евклідовому просторі ознак розпізнавання; X – бінарна навчальна матриця; $\Phi_1 : G \times T \times Z \rightarrow \Omega$ – оператор формування словника ознак розпізнавання, потужність якого залежить від вибору рецепторного поля зображень; $\Phi_2 : \Omega \rightarrow Y$ – оператор оброблення зображень, тобто формування вхідної навчальної матриці Y ; $\Phi_3 : Y \rightarrow X$ – оператор трансформації вхідної навчальної матриці в бінарний простір Хеммінга шляхом квантування ознак розпізнавання за рівнем.

На рис. 1 показано категорійну модель інформаційно-екстремального навчання системи розпізнавання зображень з оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Перевірка основної статистичної гіпотези про належність реалізацій образу здійснюється оператором класифікації $\Psi : \mathfrak{R}^{|M|} \rightarrow I^{|l|}$, де $I^{|l|}$ – множина допустимих гіпотез; l – кількість статистичних гіпотез.

Принциповою відмінністю інформаційно-екстремального машинного навчання від відомих методів є оптимізація параметрів функціонування системи розпізнавання за інформаційним КФЕ.

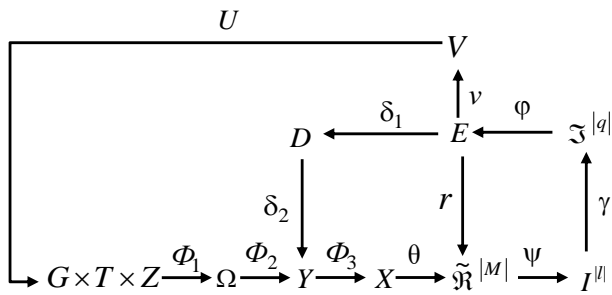


Рис. 1 – Категорійна модель машинного навчання системи розпізнавання

Для обчислення КФЕ оператор $\gamma: I^{|I|} \rightarrow \mathfrak{Z}^{|q|}$ шляхом оцінки прийнятих гіпотез формує множину точнісних характеристик $\mathfrak{Z}^{|q|}$, де $q = I^2$ – кількість точнісних характеристик, а оператор $\varphi: \mathfrak{Z}^{|q|} \rightarrow E$ обчислює на кожному кроці навчання системи терм-множину E значень інформаційного КФЕ, який є функціоналом від точнісних характеристик. Ітераційний процес оптимізації геометричних параметрів розбиття $\mathfrak{R}^{|M|}$ реалізується оператором $r: E \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}$, який на кожному кроці навчання змінює за програмою радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання з метою пошуку глобального максимуму КФЕ в робочій області визначення його функції.

Контур оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання замикається через терм-множину D , елементами якої є нижні і верхні контрольні допуски на відповідні ознаки розпізнавання.

Крім того, показана на рис. 1 категорійна модель передбачає за умови отримання недостатньо високої функціональної ефективності машинного навчання перехід за допомогою оператора $v: E \rightarrow V$ до нового типу вирішальних правил, який вибирається з упорядкованої множини V . Наприклад, при недостатній функціональній ефективності гіперсферичних вирішальних правил можна перейти до відновлення в радіальному базисі бінарного простору ознак гіпереліпсоїдних або гіперциліндродних контейнерів класів розпізнавання.

Оператор $U: V \rightarrow G \times T \times Z$ регламентує процес навчання. Оскільки в цьому контурі також застосовано процедуру обчислення інформаційного критерію E , то він дозволяє розв'язувати задачу оптимізації параметрів глибокого навчання, які на етапі оброблення зображень здійснюють редукцію словника ознак, визначають потужність алфавіту класів розпізнавання, дозволяють автоматизувати формування вхідної навчальної матриці тощо

Задача вибору та обчислення КФЕ є центральною проблемою оцінки функціональної ефективності інтелектуальної системи, що навчається, для вирішення якої застосовуються два основні підходи: один з них базується на дистанційних критеріях близькості, а інший – на інформаційних. Подолання існуючої суперечності між цими підходами і усунення їх недоліків досягається шляхом застосування ідей і методів

ІЕІ-технології, в рамках якої інформаційний КФЕ машинного навчання є функціоналом від точнісних характеристик системи розпізнавання. При цьому точнісні характеристики, в свою чергу, залежать від дистанційної міри – геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання, які відновлюються в процесі навчання в радіальному базисі простору ознак розпізнавання. Таким чином, інформаційний критерій в рамках ІЕІ-технології розглядається як загальний критерій оптимізації параметрів навчання.

У рамках ІЕІ-технології як КФЕ знайшли широке використання модифікації двох інформаційних мір: інтегрального ентропійного критерію Шеннона і диференційної міри Кульбака. Модифікація нормованого ентропійного КФЕ для двохальтернативних рішень із апріорно рівномірними гіпотезами має вигляд [2]

$$E_m^{(k)} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_m^{(k)}(d)}{\alpha_m^{(k)}(d) + D_{2,m}^{(k)}(d)} \log_2 \frac{\alpha_m^{(k)}(d)}{\alpha_m^{(k)}(d) + D_{2,m}^{(k)}(d)} + \frac{\beta_m^{(k)}(d)}{D_{1,m}^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)} \log_2 \frac{\beta_m^{(k)}(d)}{D_{1,m}^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)} + \frac{D_{1,m}(d)}{D_{1,m}^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)} \log_2 \frac{D_{1,m}(d)}{D_{1,m}^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)} + \frac{D_{2,m}^{(k)}(d)}{\alpha_m^{(k)}(d) + D_{2,m}^{(k)}(d)} \log_2 \frac{D_{2,m}^{(k)}(d)}{\alpha_m^{(k)}(d) + D_{2,m}^{(k)}(d)} \right), \quad (3)$$

де $\alpha_m^{(k)}(d)$ – помилка першого роду прийняття рішень на k -му кроці навчання;

$\beta_m^{(k)}(d)$ – помилка другого роду;

$D_{1,m}^{(k)}(d)$ – перша достовірність;

$D_{2,m}^{(k)}(d)$ – друга достовірність;

d – дистанційна міра, яка визначає радіуси гіперсферичних контейнерів, побудованих в радіальному базисі простору Хеммінга.

У формулі (3) виключається загроза поділу на нуль, оскільки значення першої та другої достовірностей в робочій області визначення інформаційного критерію оптимізації дорівнюють більше 0,5.

Оскільки інформаційно-екстремальні методи машинного навчання ґрунтуються на принципі відкладених рішень Івахненка О. Г., який передбачає можливість оптимізації інших параметрів навчання з метою підвищення достовірності вирішальних правил, то категорійна модель (рис. 1) може доповнюватися контурами оптимізації цих параметрів. При цьому умовою такої композиції категорійної моделі є обов'язкова належність цим контурам множини E .

Таким чином, показана на рис. 1 категорійна модель у вигляді орієнтованого графа може розглядатися як узагальнена структурна схема алгоритму інформаційно-екстремального навчання системи розпізнавання.

Алгоритм навчання системи розпізнавання. Алгоритм навчання системи розпізнавання розгляне-

мо на прикладі оптимізації параметрів навчання, які задаються структурою

$$g = \langle \delta; y_1, \dots, y_M; d_1, \dots, d_M \rangle, \quad (4)$$

де δ – параметр, величина якого дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання, якими є значення яскравості в пікселях рецепторного поля кадру;

y_1, \dots, y_M – еталонні (усереднені) вектори – реалізації кожного зображення із заданого алфавіту;

d_1, \dots, d_M – радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, які відновлюються в радіальному базисі простору ознак розпізнавання.

При цьому на параметри навчання задаються відповідні обмеження на області їх значень: $\delta < \delta_H / 2$, де δ_H – нормоване (експлуатаційне) поле допусків для ознак розпізнавання; $d_m < d(y_m, y_c)$, де $d(y_m, y_c)$ – міжцентрова відстань між еталонною реалізацією $y_m \in X_m^o$ і найближчою еталонною реалізацією y_c сусіднього класу X_c^o .

Вхідною інформацією для навчання за інформаційно-екстремальним алгоритмом є масив векторів-реалізацій зображень $\{y_{m,i} \mid m = \overline{1, M}, i = \overline{1, n}\}$, які система повинна навчитися розпізнавати; нормоване поле допусків δ_H на ознаки розпізнавання, яке задає область значень відповідних контрольних допусків і рівні селекції $\{\rho_m\}$, які використовуються при формуванні координат двійкових еталонних векторів класів розпізнавання і які за замовчуванням дорівнюють 0,5 для всіх класів розпізнавання.

Згідно з категорійною моделлю (рис. 1) алгоритм інформаційно-екстремального навчання подається у вигляді двохциклічної процедури пошуку глобального максимуму усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного критерію (3) в робочій області визначення його функції [4]

$$\delta^* = \arg \max_{\delta} \{ \max_{G_E \cap \{k\}} \bar{E}^{(k)} \}, \quad (5)$$

де $\bar{E}^{(k)}$ – усереднене за алфавітом класів розпізнавання значення інформаційного критерію, обчислене на k -му кроці машинного навчання;

G_δ – допустима область значень параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання;

G_E – робоча (допустима) область визначення функції критерію \bar{E} ;

$\{k\}$ – впорядкована множина кроків навчання.

Спочатку розглянемо алгоритм машинного навчання з паралельною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання, за якою на кожному кроці навчання змінюються з однаковим кроком нижні та верхні контрольні допуски для всіх ознак одночасно. Аналіз процедури (4) показує, що основна обчислювальна трудомісткість алгоритму навчання реалізується у внутрішньому циклі, основними функціями якого є:

- обчислення на кожному кроці навчання значення інформаційного критерію (3);
- пошук глобального максимуму критерію (3) в робочій області визначення його функції, в якій перша і друга достовірності перевершують відповідно помилки першого і другого роду;
- визначення оптимальних в інформаційному розумінні радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання.

Функцією зовнішнього циклу є зміна із заданим кроком параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання і визначення його оптимального значення при глобальному максимумі критерію (3) в робочій області визначення його функції.

Розглянемо на прикладі оптимізації радіусу контейнера класу X_m^o основні етапи реалізації алгоритму (5) у внутрішньому циклі при заданому зовнішнім циклом значенні параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання:

1. Формування бінарної навчальної матриці $\|x_{m,i}^{(j)}\|$, елементи якої дорівнюють

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \in \delta_{K,i}; \\ 0, & \text{if } y_{m,i}^{(j)} \notin \delta_{K,i}, \end{cases}$$

де $\delta_{K,i}$ – поточне контрольне поле i -ї ознаки розпізнавання.

2. Формування масиву еталонних двійкових векторів $\{x_{m,i} \mid m = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}\}$, елементи якого визначаються за правилом:

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,i}^{(j)} > \rho_m; \\ 0, & \text{if } \text{else}, \end{cases}$$

де ρ_m – рівень селекції координат вектора $x_m \in X_m^o$.

3. Розбиття множини еталонних векторів на пари найближчих «сусідів»: $\mathfrak{R}_m^{(2)} = \langle x_m, x_l \rangle$, де x_l – еталонний вектор сусіднього класу X_l^o , за таким алгоритмом:

а) структурується множина еталонних векторів, починаючи з вектора x_1 базового класу X_1^o , який характеризує найбільшу функціональну ефективність інтелектуальної системи;

б) будується матриця кодових відстаней між еталонними векторами розмірності $M \times M$;

в) для кожної строки матриці кодових відстаней знаходиться мінімальний елемент, який належить стовпчику вектора – найближчого до вектора, що визначає строку;

г) формується структурована множина елементів попарного розбиття $\{\mathfrak{R}_m^{(2)} \mid m = \overline{1, M}\}$, яка задає план навчання.

4. На кожному кроці навчання змінюється радіус d_m контейнера класу X_m^o і обчислюється критерій (3).

5. Процедура закінчується при знаходженні максимуму КФЕ в робочій області його визначення:

$$E_m^* = \max_{\{d\}} E_m,$$

де $\{d\} = \{0, 1, \dots, d < d(x_m \oplus x_c)\}$ – множина радіусів концентрованих гіперсфер, центр яких визначається вершиною вектора $x_m \in X_m^o$;

x_c – еталонний вектор класу X_c^o , найближчого до класу X_m^o .

6. Визначається оптимальне значення радіусу контейнера класу розпізнавання X_m^o :

$$d_m^* = \arg \max_{\{d\}} E_m^*.$$

Після визначення оптимальних геометричних параметрів контейнерів для всіх класів розпізнавання із заданого алфавіту обчислюється усереднене максимальне значення інформаційного КФЕ і оптимальний параметр δ^* поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Оскільки машинне навчання з паралельною оптимізацією не завжди забезпечує його високу функціональну ефективність, то отримане в процесі оптимізації значення параметра поля контрольних допусків слід вважати квазіоптимальним. Для підвищення функціональної ефективності доцільно реалізувати алгоритм машинного навчання з послідовною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання, в якому за стартові приймаються визначенні за алгоритмом (4) квазіоптимальні контрольні допуски.

Схема алгоритму машинного навчання з послідовною оптимізацією в рамках ІЕІ-технології розглядається у вигляді процедури

$$\{\delta_i^*\} = \arg \otimes \left\{ \max_{G_\delta} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{G_{E \cap \{k\}}} E_m^{(k)} \right\}, i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

де \otimes – символ операції повторення ітераційних циклів пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ в робочій області визначення його функції;

L – кількість прогонів ітераційної процедури послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Таким чином, основною процедурою інформаційно-екстремального навчання є оптимізація параметрів, які впливають на функціональну ефективність системи розпізнавання за інформаційним КФЕ.

Результати фізичного моделювання. Вище наведений алгоритм машинного навчання було реалізовано на прикладі розпізнавання трьох автомобілів, зображення яких знаходилися в базі даних геоінформаційної системи розпізнавання, яка функціонувала стаціонарно в режимі спостереження на автомагістралі.

Вхідна навчальна матриця яскравості формувалася за зображеннями трьох різних типів автомобілів розміром 50×50 пікселів, показаних на рис. 2.

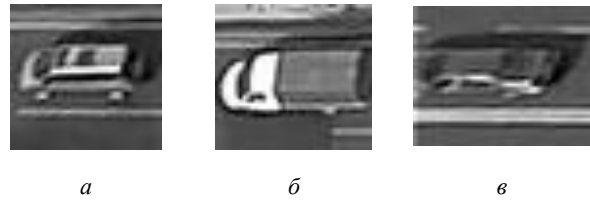


Рис. 2 – Зображення транспортних засобів: а – легкова машина міні-вен (клас X_1^o); б – вантажна машина (клас X_2^o); в – легкова машина (клас X_3^o)

Спочатку було реалізовано алгоритм машинного навчання (5) з паралельною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання. При цьому як критерій оптимізації параметрів функціонування (4) системи розпізнавання використовувався інформаційний критерій (3).

На рис. 3 показано графік залежності усередненого за алфавітом класів розпізнавання критерію (3) від параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання, отриманий в процесі машинного навчання за алгоритмом (5).

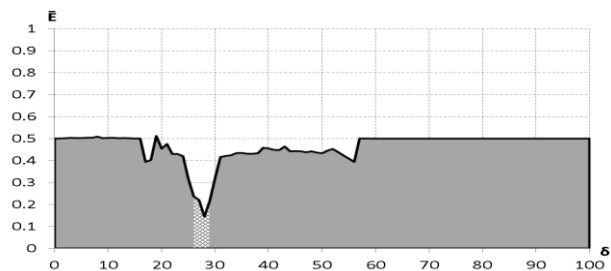


Рис. 3 – Графік залежності усередненого КФЕ від параметра поля контрольних допусків

На графіку (рис. 1) світлою ділянкою позначено робочу область визначення функції критерію (3). Аналіз графіка показує, що оптимальне значення параметра поля контрольних допусків дорівнює $\delta^* = \pm 27$ градацій яскравості пікселів рецепторного поля на зображеннях об'єктів розпізнавання. При цьому максимальне значення усередненого КФЕ в його робочій області дорівнює всього $\bar{E}_{\max} = 0,24$, що свідчить про невисоку функціональну ефективність машинного навчання.

В процесі машинного навчання з паралельною оптимізацією контрольних допусків було отримано такі значення радіусів контейнерів класів розпізнавання: для класу $X_1^o - d_1^* = 14$ (тут і далі в кодових одиницях), для класу $X_2^o - d_2^* = 15$ і для класу $X_3^o - d_3^* = 10$. Відповідно середня міжцентрова відстань для заданого алфавіту класів дорівнює $d_{\text{сер}}^* = 13$. При оптимізації контейнерів отримано максимальні значення критерію (3) і точнісіньких характеристик: для класу $X_1^o - E_1^* = 0,59$ ($D_{1,1}^* = 0,65, \beta_1^* = 0,03$); для класу $X_2^o - E_2^* = 0,61$ ($D_{1,2}^* = 0,60, \beta_2^* = 0$) і для класу $X_3^o - E_3^* = 0,43$ ($D_{1,3}^* = 0,53, \beta_3^* = 0,04$).

Оскільки побудовані вирішальні правила характеризуються невисокою достовірністю розпізнавання, то для підвищення функціональної ефективності машинного навчання було реалізовано алгоритм (6) з послідовною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання. На рис. 4 показано графік зміни максимуму інформаційного усередненого критерію (3) від кількості ітерацій (кроків навчання) в процесі послідовної оптимізації контрольних допусків із стартовим параметром поля контрольних допусків

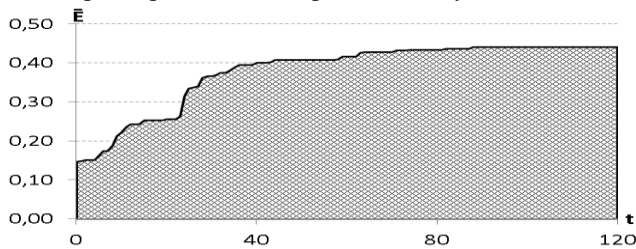


Рис. 4 – Графік зміни КФЕ в процесі послідовної оптимізації контрольних допусків

Аналіз рис. 4 показує, що процес послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання завершився на 92-й ітерації, тобто на другому прогоні процедури (6). При цьому максимальне значення усередненого критерію (3) збільшилося до $\bar{E}_{\max} = 0,44$, тобто майже в два рази у порівнянні з паралельною оптимізацією. Крім того, використання квазіоптимальних контрольних допусків як стартових при їх послідовній оптимізації забезпечує постійне знаходження КФЕ в робочій області, що суттєво підвищує оперативність алгоритму навчання.

Для побудови вирішальних правил в процесі машинного навчання з послідовною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання було отримано графіки залежності критерію (3) від радіусів контейнерів класів розпізнавання, показані на рис. 5.

Аналіз результатів оптимізації показує, що оптимальними радіусами контейнерів класів розпізнавання є: для класу $X_1^o - d_1^* = 12$, для класу $X_2^o - d_2^* = 13$, для класу $X_3^o - d_3^* = 11$. Відповідно середня міжцентрова відстань для класів розпізнавання дорівнює $d_{\text{сер}}^* = 12$. Тому згідно з мінімально-дистанційним принципом теорії розпізнавання образів можна стверджувати, що функціональна ефективність вирішальних правил, побудованих в процесі машинного навчання з послідовною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання, є вищою у порівнянні з паралельною оптимізацією. Цим параметрам контейнерів відповідають такі значення КФЕ і точнісних характеристик системи розпізнавання: для класу $X_1^o - E_1^* = 0,60$ ($D_{1,1}^* = 0,65, \beta_1^* = 0,12$); для класу $X_2^o - E_2^* = 0,60$ ($D_{1,2}^* = 0,70, \beta_2^* = 0,09$) і для класу $X_3^o - E_3^* = 0,43$ ($D_{1,3}^* = 0,50, \beta_3^* = 0,18$). При цьому повна ймовірність прийняття правильних рішень щодо розпізнавання автомобіля класу X_1^o дорівнює 0,72, класу $X_2^o - 0,80$ і класу $X_3^o - 0,66$.

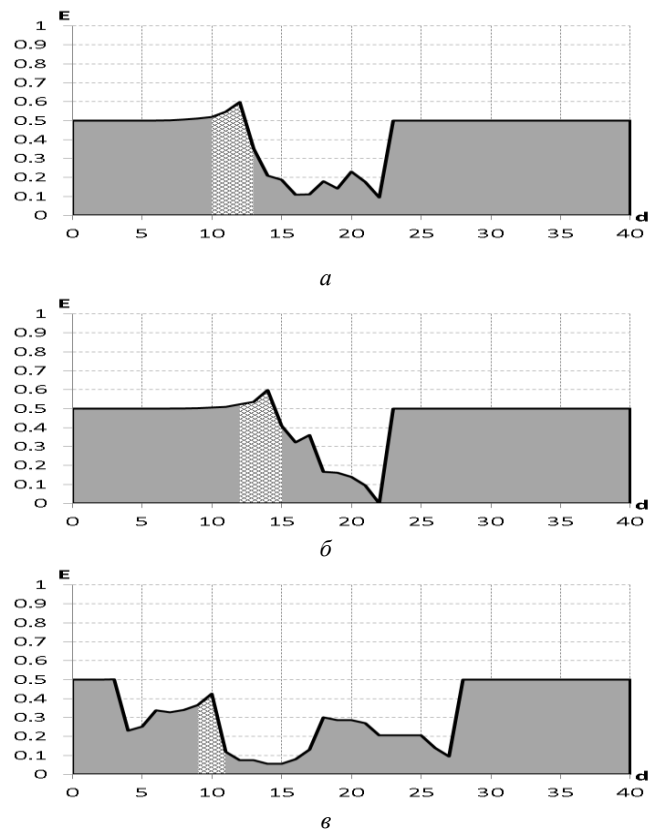


Рис. 5 – Графіки залежності КФЕ навчання системи від радіусів контейнерів класів розпізнавання:

а – клас X_1^o ; б – клас X_2^o ; в – клас X_3^o

Наведені результати машинного навчання системи розпізнавання можна вважати задовільними, але вони не дозволили побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила. Тому для підвищення функціональної ефективності машинного навчання системи відоспостереження для розпізнавання транспортного засобу на автомагістралі необхідно оптимізувати інші параметри навчання. Якщо підвищення функціональної ефективності системи у цьому випадку не відбувається, то згідно з категорійною моделлю необхідно перейти на більш складний тип вирішальних правил, наприклад, гіпереліпсоїдний або гіперциліндродійний [5].

Висновки. Розроблено інформаційно-екстремальний алгоритм машинного навчання геоінформаційної системи розпізнавання транспортних засобів, що рухаються по автомагістралі. Як параметри функціонування системи розпізнавання, що оптимізуються, розглядалися радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, які відновлюються в процесі машинного навчання в радіальному базисі простору ознак розпізнавання, і система контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Запропоновано оптимізацію контрольних допусків на ознаки розпізнавання здійснювати за паралельно-послідовним алгоритмом. При цьому одержані в процесі паралельної оптимізації квазіоптимальні контрольні допуски розглядалися як стартові для алгоритму їх послідовної оптимізації, що забезпечує постійне знаходження значень інформаційного критерію оптимізації в робочій області визна-

чення його функції і суттєво підвищує оперативність машинного навчання. Побудовані в процесі машинного навчання вирішальні правила не є безпомилковими за навчальною матрицею, тому для підвищення

їх функціональної ефективності необхідно здійснювати оптимізацію інших параметрів навчання або переходити до більш складних радіально-базисних вирішальних правил.

Список літератури

1. *Ratner, B.* Statistical and machine-learning data mining: techniques for better predictive modeling and analysis of big data, Second edition [Text] / *B. Ratner.* – CRC Press, 2011. – 542 p.
2. *Bodyanskiy E. V.* Recurrent neural network detecting changes in the properties of nonlinear stochastic sequences / *E. V. Bodyanskiy, S. A. Vorob'ev* // Automation and Remote Control. –2000. – Vol. 1. – №7. – P. 1113–1124.
3. *Duda R. O.* Pattern Classification : second ed. / *R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork.* – New York : John Wiley & Sons, 2001. – 738 p.
4. *Довбиш А. С.* Основи проектування інтелектуальних систем : Навчальний посібник / *А. С. Довбиш.* – Суми : Вид-во СумДУ, 2009. – 171 с.
5. *Dovbysh A. S.* Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes / *A. S. Dovbysh, N. N. Budnyk, V. V. Moskalenko* // Journal of automation and information sciences. – 2012. – Vol. 44, Is. 10. – P. 35–44.

References (transliterated)

1. *Ratner B.* *Statistical and machine-learning data mining: techniques for better predictive modeling and analysis of big data.* – CRC Press, 2011. – 542 p.
2. *Bodyanskiy E. V., Vorob'ev S. A.* Recurrent neural network detecting changes in the properties of nonlinear stochastic sequences. *Automation and Remote Control.* –2000, vol 1, no. 7, pp. 1113–1124.
3. *Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G.* Pattern Classification.– New York, John Wiley Publ., 2001, 738 p.
4. *Dovbysh A. S.* *Osnovy proektuvannya intelektualnykh system : Navchalnyy posibnyk [Fundamentals of Design Intelligent Systems: Tutorial].* Sumy, SumDU Puobl., 2009, 171 p.
5. *Dovbysh A. S., Budnyk N. N., Moskalenko V. V.* Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes. *Journal of automation and information sciences.* 2012, vol. 44, issue 10, p. 35–44.

Надійшла (received) 25.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання геоінформаційної системи / А. С. Довбиш, Ю. В. Симоновський, О. В. Коробченко, М. А. Летюга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 22–28. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Информационно-экстремальный алгоритм обучения геоинформационной системы / А. С. Довбиш, Ю. В. Симоновский, Е. В. Коробченко, М. А. Летюга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 22–28. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Information and Extreme learning algorithm of geographic information system / А. S. Dovbysh, J. V. Simonovskiy, O. V. Korobchenko, M. A. Letuga // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 22–28. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довбиш Анатолій Степанович – Сумський державний університет, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук, науковий керівник проблемної науково-дослідницької лабораторії інтелектуальних систем; тел.: (050) 307 83 74; e mail: kras@id.sumdu.edu.ua

Довбиш Анатолій Степанович – Сумской государственной университет, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных наук, научный руководитель проблемной научно-исследовательской лаборатории интеллектуальных систем; тел.: (050) 307-83-74; e-mail: kras@id.sumdu.edu.ua

Dovbysh Anatoliy Stepanovich – Sumy State University, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Supervisor of Problem Research Laboratory of Intelligent Systems; tel.: (050) 307 83 74; e mail: kras@id.sumdu.edu.ua

Симоновский Юлий Витальевич – Сумський державний університет, провідний фахівець; тел.: (099) 099-01-90; e-mail: julius.simonovskii@gmail.com

Симоновский Юлий Витальевич – Сумской государственной университет, ведущий специалист; тел.: (099) 099-01-90; e-mail: julius.simonovskii@gmail.com

Julius Vitalievich Simonovskiy – Sumy State university, Leading Researcher; tel.: (099) 099-01-90; e-mail: julius.simonovskii@gmail.com

Коробченко Елена Владиславівна – Сумський державний університет, провідний фахівець; тел.: (095) 542-63-85; e-mail: elena9191@gmail.com

Коробченко Елена Владиславовна – Сумской государственной университет, ведущий специалист; тел.: (095) 542-63-85; e-mail: elena9191@gmail.com

Korobchenko Olena Vladislavivna – Sumy State university, Leading Researcher; tel.: (095) 542-63-85; e-mail: elena9191@gmail.com

Летюга Максим Анатолійович – Сумський державний університет, студент; e-mail: infos21@i.ua

Летюга Максим Анатолиевич – Сумской государственной университет, студент; e-mail: infos21@i.ua

Letuga Maxim Anatolievich – Sumy State University, student; e-mail: infos21@i.ua

В. О. ДРОФА

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТРОЛЬНИХ ДОПУСКІВ НА ОЗНАКИ РОЗПІЗНАВАННІ ПРИ МАШИННОМУ НАВЧАННІ

Запропоновано в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології аналізу даних алгоритм машинного навчання системи розпізнавання зображень морфології тканин при діагностуванні онкопатологій. При цьому оптимізація контрольних допусків на діагностичні ознаки здійснюється за паралельно-последовательним алгоритмом, що дозволяє підвищити достовірність і оперативність машинного навчання. Для забезпечення інваріантності алгоритму навчання системи розпізнавання до зсуву та повороту оброблення зображень здійснювалося у полярній системі координат. Реалізація алгоритму розглянуто на прикладі розпізнавання цифрових морфологічних зображень тканин, отриманих методом біопсії.

Ключові слова: система розпізнавання, оптимізація, контрольні допуски, машинне навчання, зображення, інформаційний критерій, функціональна ефективність.

Предложено в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии анализа данных алгоритм машинного обучения системы распознавания изображений морфологии тканей при диагностировании онкопатологий. При этом оптимизация контрольных допусков на диагностические признаки осуществляется параллельно-последовательным алгоритмом, позволяющим повысить достоверность и оперативность машинного обучения. Для обеспечения инвариантности алгоритма обучения системы распознавания к смещению и поворота обработки изображений осуществлялось в полярной системе координат. Реализация алгоритма рассмотрена на примере распознавания цифровых морфологических изображений тканей, полученных методом биопсии.

Ключевые слова: система распознавания, оптимизация, контрольные допуски, машинное обучение, изображения, информационный критерий, функциональная эффективность.

The article present method under extreme intellectual information technologies of data analysis algorithm machine learning image recognition system tissue morphology in the diagnosis cancer. This optimization control tolerances diagnostic signs carried by parallel-sequential algorithm, which improves the reliability and efficiency of machine learning to provide training algorithm invariance recognition system to shift and rotate images processing was carried out in a polar coordinate system. As functional efficiency criterion used Shannon entropy measure. Application of such algorithm allows to consider the quasioptimal control tolerances received in the course of parallel optimization, as start for serial algorithm. It guarantees a finding in the course of optimization values of entropy criterion of the functional learning efficiency in working (admissible) area determination of its function. Implementing the algorithm considers the example of morphological recognition of digital images of tissue obtained by biopsy.

Keywords: recognition system, optimization, control tolerances, machine learning, image, information criterion, functional efficiency.

Вступ. Основною тенденцією розвитку комп'ютеризованих систем діагностування є застосування інтелектуальних технологій аналізу даних на основі машинного навчання та розпізнавання образів [1, 2]. При цьому складність розпізнавання цифрових морфологічних зображень тканин пацієнтів, отриманих за методом біопсії, викликана такими факторами, як багатовимірність словника діагностичних ознак і алфавіту класів розпізнавання, довільні початкові умови формування зображень і суттєвий перетин класів розпізнавання, що обумовлює априорно нечітке розбиття простору діагностичних ознак на класи розпізнавання. Для підвищення функціональної ефективності систем розпізнавання зображень медичних і біологічних об'єктів перспективним є використання ідей і методів інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології) [3, 4], що базується на максимізації інформаційної спроможності здатної навчатися системи розпізнавання, яка є основною складовою інтелектуальної комп'ютеризованої системи діагностування. У праці [5] в рамках ІЕІ-технології розглядався так званий базовий алгоритм машинного навчання системи розпізнавання морфологічних зображень тканин пацієнтів для розпізнавання раку молочної залози, але отримані результати не дозволили досягнути високої функціональної ефективності машинного навчання через неоптимальні контрольні допуски на діагностичні ознаки.

У статті розглядається інформаційно-екстре-

мальний алгоритм машинного навчання системи розпізнавання з паралельно-последовательною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Постановка задачі. Розглянемо здатну навчатися систему розпізнавання морфологічних зображень тканин пацієнтів, отриманих методом біопсії. Нехай дано у загальному випадку нечіткий алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^o, m = \overline{1, M}\}$, які характеризують як доброякісні, так і злякісні онкопатології. Для заданого алфавіту класів розпізнавання сформовано вхідну навчальну матрицю яскравості пікселів рецепторного поля зображень типу «об'єкт-властивість»

$$\|y_{m,i}^{(j)}\|, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, n},$$

де N, n – кількість діагностичних ознак і кількість векторів-реалізацій образу відповідно. Для системи розпізнавання відомий структурований вектор параметрів навчання

$$g_m = \langle g_{m,1}, \dots, g_{m,q}, \dots, g_{m,Q} \rangle \quad (1)$$

із відповідними обмеженнями.

В режимі навчання необхідно знайти оптимальні (тут і далі в інформаційному розумінні) координати вектора параметрів навчання (1) шляхом пошуку глобального максимуму інформаційного критерію функціональної ефективності (КФЕ) в робочій області визначення його функції:

$$\bar{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_m^* \quad (2)$$

де E_m^* – максимальне значення КФЕ навчання системи діагностування розпізнавати реалізації класу X_m^0 .

Опис алгоритму. Оскільки контрольні допуски на значення ознак розпізнавання прямо впливають на геометричні параметри контейнерів класів розпізнавання, а таким чином і на асимптотичні точнісні характеристики рішень, то питання оптимізації системи контрольних допусків (СКД) у методах ІЕІ-технології набуває важливого значення при розробленні інформаційного забезпечення системи, що навчається.

Розглянемо алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання зображень з оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання. На рис. 1 показано симетричне (двобічне) поле допусків на значення i -ї ознаки розпізнавання y_i .

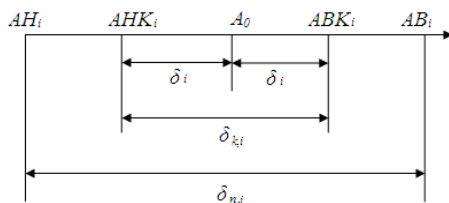


Рис. 1 – Симетричне поле допусків на ознаку розпізнавання

На рис. 1. прийнято такі позначення:

A_0 – номінальне значення ознаки y_i ;

AN_i, AB_i – нижній і верхній нормовані допуски відповідно;

ANK_i, ABK_i – нижній і верхній контрольні допуски відповідно;

$\delta_{n,i}$ – нормоване поле допусків;

$\delta_{k,i}$ – контрольне поле допусків;

δ_i – параметр поля симетричний центру допусків, який дорівнює половині його довжини.

Категорійна модель відображень множин у процесі машинного навчання з оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання показана на рис. 2.

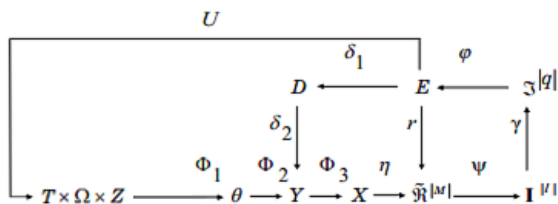


Рис.2 – Структурна діаграма процесу машинного навчання

На рис.2 прийнято такі позначення:

Y – множина сигналів, які знімаються з виходу блоку первинної обробки інформації;

$\bar{\mathfrak{R}}^{|M|}$ – нечітке розбиття;

$I^{|l|}$ – множина можливих рішень,

E – множина значень інформаційного КФЕ;

$\mathfrak{Z}^{|q|}$ – множина точнісних характеристик;

θ – спектр яскравості зображення;

Φ_1 – оператор обробки зображень в полярних координатах;

Φ_2 – оператор формування множини Y ;

Φ_3 – оператор формування навчальних матриць.

Контур, в якому знаходиться впорядкована термножина D оптимізує систему контрольних допусків на ознаки розпізнавання в процесі цілеспрямованого пошуку глобального максимуму критерію (2). Оператор U регламентує процес машинного навчання.

Оптимізацію контрольних допусків на ознаки розпізнавання будемо здійснювати за паралельно-послідовним алгоритмом.

Перевагою паралельного алгоритму (3) оптимізації СКД є висока оперативність реалізації алгоритму, але він не дозволяє одержати точне значення глобального максимуму КФЕ в робочій області визначення його функції. Тому екстремальні значення параметрів навчання системи, одержані в процесі їх оптимізації за паралельним алгоритмом, є квазіоптимальними.

Алгоритм послідовної (4) оптимізації СКД дозволяє обчислювати точні значення глобального максимуму КФЕ в робочій області, але характеризується низькою оперативністю.

З метою поєднання переваг цих алгоритмів оптимізацію СКД на ознаки розпізнавання доцільно здійснювати на практиці за паралельно-послідовним алгоритмом. При цьому реалізація паралельного алгоритму дозволяє визначити стартові контрольні допуски, які є вхідними для алгоритму послідовної оптимізації. Це дозволяє підвищити оперативність послідовного алгоритму, оскільки стартові квазіоптимальні контрольні допуски вже знаходяться в робочій області визначення функції КФЕ.

Алгоритм оптимізації контрольних допусків, як і інших параметрів функціонування системи розпізнавання, у рамках ІЕІ-технології полягає у наближенні глобального максимуму інформаційного критерію оптимізації, що обчислюється в робочій області визначення функції, до граничного найбільшого його значення.

Алгоритм паралельної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання здійснюється за ітераційною процедурою пошуку глобального значення інформаційного КФЕ в робочій (допустимій) області визначення його функції:

$$\{\delta_{k,i}^* \mid i = \overline{1, N}\} = \arg \max_{G_\delta} \max_{G_E \cap G_d} \bar{E}, \quad (3)$$

де $\delta_{k,i}^*$ – оптимальне значення параметра поля контрольних допусків;

G_δ, G_E, G_d – області допустимих значень контрольних допусків на ознаки розпізнавання, інформаційного КФЕ і радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, що відновлюються у процесі навчання в радіальному базисі простору ознак відповідно.

Алгоритм послідовної оптимізації поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання має вигляд:

$$\{\delta_{K,i}^*\} = \langle \arg\{\max_{G_{\delta_i}} \{\max_{G_E} [\otimes_{l=1}^L \max_{G_{d_1}} E_1^{(l)}]\}\} \rangle, i = \overline{1, N}, (4)$$

де $G_{\delta_i}, G_E, G_{d_1}$ – області допустимих значень поля контрольних допусків для i -ї ознаки, критерію оптимізації і радіуса d_1 контейнера класу X_1^0 відповідно; \otimes – символ операції повторення.

Функціональна ефективність є важливою характеристикою системи діагностування, що навчається. Функціональна ефективність, як складова загальної ефективності, визначає ступінь відповідності функціонування системи за її робочим алгоритмом виконання поставленої перед нею задачі, згідно з критерієм мети. Важливою складовою критерію мети є інформаційний критерій функціональної ефективності (КФЕ) навчання системи, що є функціоналом від точнісних характеристик рішень, які приймаються системою.

Результати. Розглянемо результати реалізації запропонованого алгоритму на прикладі навчання СППР на етапі діагностування морфологічних зображень тканин пацієнтів, отриманих методом біопсії.

З метою забезпечення інваріантності алгоритму навчання КСД до зсуву та повороту зображень їх оброблення здійснювалося в полярній системі координат, в якій значення яскравості пікселів рецепторного поля зображення зчитуються за правилами

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi; \\ y &= r \sin \varphi, \end{aligned} (5)$$

де r, φ – радіус і кут кола зчитування відповідно.

Формування навчальної матриці здійснювалося шляхом оброблення зображень в полярних координатах за формулою

$$\Theta_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \theta_i, (6)$$

де Θ_j – усереднене значення яскравості пікселів, що належать колу зчитування j -го радіусу, $j = \overline{0, R}$;

θ_i – значення яскравості кольорової складової в i -му пікселі;

N_j – загальна кількість пікселів в j -му колі зчитування.

Усереднені значення яскравості в кожному колі зчитування розглядаються як координати структурованого вектора – реалізації зображення. Оскільки зображення морфології тканин є кольоровими, то їх оброблення здійснювалося в форматі RGB. При цьому навчальна матриця складалася відповідно із трьох RGB-складових.

Алфавіт класів розпізнавання складається з чотирьох зображень, що характеризують онкологічні захворювання.

У табл. 1 показано приклади зображень морфології тканин, отримані за методом біопсії.

Таблиця 1 – Алфавіт класів розпізнавання

№ класу	Позначення	Назва	Зображення
1	X_1^0	Інтраканалікулярна фіброаденома	
2	X_2^0	Філоїдна фіброаденома псевдосаркоматозна	
3	X_3^0	Периканалікулярна непроліферативна фіброаденома	
4	X_4^0	Мазоплазія	

Для оцінки функціональної ефективності СППР використовувався інформаційний критерій Шеннона

$$\begin{aligned} E &= 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{D_1}{D_1 + \beta} \log \frac{D_1}{D_1 + \beta} + \frac{\beta}{D_1 + \beta} \log \frac{\beta}{D_1 + \beta} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1 - D_1}{2 - D_1 - \beta} \log \frac{1 - D_1}{2 - D_1 - \beta} \right), \end{aligned} (7)$$

де D_1, β – перша достовірність та помилка другого роду відповідно.

На рис.3. показано графік залежності ентропійного критерію (7) від параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання, отриманий при паралельній їх оптимізації.

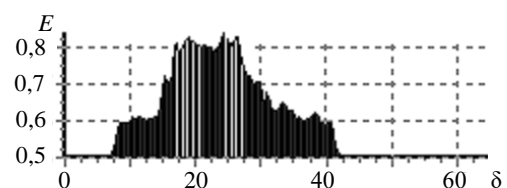


Рис. 3 – Графік залежності КФЕ від параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання

Аналіз рис. 3 показує, що оптимальний параметр поля контрольних допусків дорівнює $\delta_{K,i}^* = \pm 24$, а максимальне значення інформаційного критерію (7) – $\overline{E}^* = 0,86$.

На рис. 4 показано графіки залежності критерія функціональної ефективності (КФЕ) від контейнера класу за паралельним алгоритмом. На графіку штриховані ділянки позначають робочі (допустимі) області визначення функції інформаційного критерію, в яких одночасно виконуються умови: перша достовірність і помилка другого роду приймають значення $D_1 > 0,5$ і $\beta < 0,5$ відповідно.

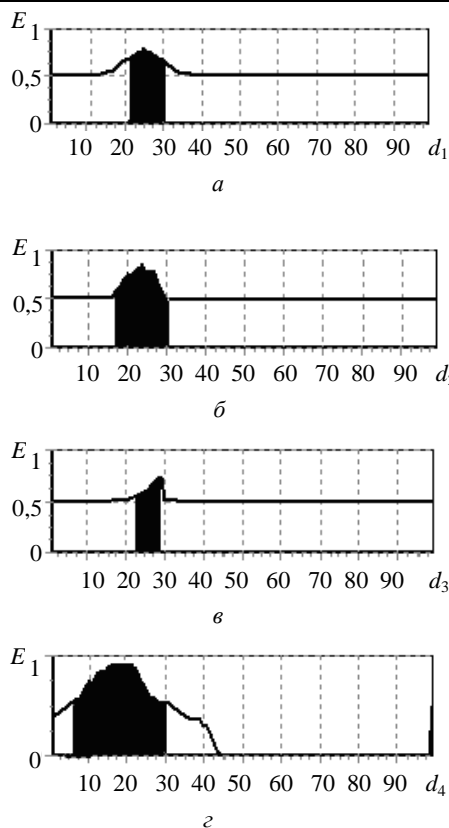


Рис. 4 – Графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а – X_1^0 , б – X_2^0 , в – X_3^0 , г – X_4^0

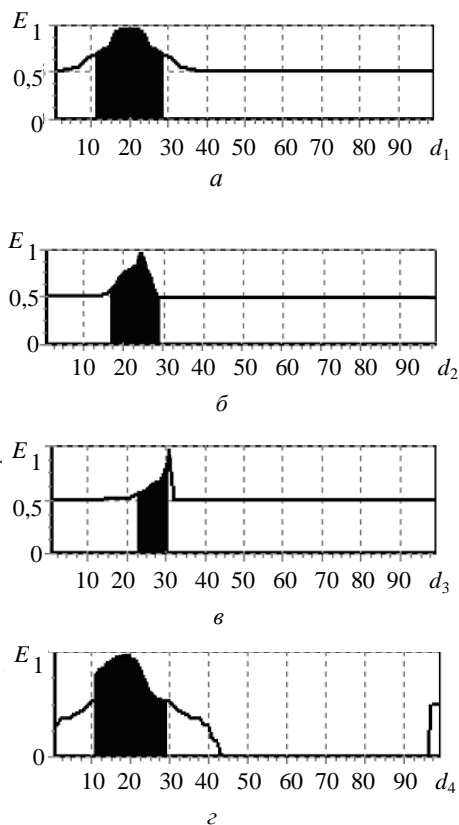


Рис. 5 – Графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а – X_1^0 , б – X_2^0 , в – X_3^0 , г – X_4^0

В табл.2 подано оптимальні параметри для класів розпізнавання за паралельним алгоритмом.

Таблиця 2 – Оптимальні параметри навчання системи розпізнавання

Клас	КФЕ	Радіус	D_1	β
X_1^0	0,76	24	1,00	0,03
X_2^0	0,83	24	0,93	0,00
X_3^0	0,74	29	0,87	0,00
X_4^0	0,88	22	0,97	0,00

На рис. 5 показано графіки залежності критерія функціональної ефективності (КФЕ) від контейнера класу за паралельно-послідовним алгоритмом.

На рис. 6 показано графік залежності КФЕ від кількості ітерацій алгоритму навчання СППР та отримано усереднене значення КФЕ навчання $\bar{E}^* = 0,98$.

В табл.3 подано оптимальні параметри для класів розпізнавання за паралельно-послідовним алгоритмом.

Аналіз отриманих результатів за паралельно-послідовним алгоритмом свідчить про те, що у порівнянні з паралельним алгоритмом, він дає кращі результати параметрів навчання та дозволяє підвищити оперативність оптимізації системи контрольних допусків на діагностичні ознаки при забезпеченні максимальної асимптотичної достовірності навчання СППР.



Рис. 6 – Графік залежності КФЕ від кількості ітерацій алгоритму навчання СППР

Таблиця 3 – Оптимальні параметри навчання системи розпізнавання

Клас	КФЕ	Радіус	D_1	β
X_1^0	0,98	23	1,00	0,03
X_2^0	0,98	25	0,97	0,00
X_3^0	0,98	31	0,97	0,00
X_4^0	0,98	22	0,97	0,00

Висновки. В роботі запропоновано категорійну модель і на її основі реалізовано алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання нестационарних за яскравістю зображень із оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. При цьому формування вхідної навчальної матриці здійснювалося шляхом оброблення зображень в полярній системі координат,

що дозволило забезпечити інваріантність алгоритму навчання до їх зсуву і повороту

Отримані в процесі фізичного моделювання результати показали, що реалізація алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання системи діагностування онкопатологій за зображеннями морфології тканин з паралельно-послідовною оптимізацією ознак розпізнавання дозволяє підвищити достовірність діагностичних рішень у порівнянні з паралельною оптимізацією.

Список літератури

1. *Литвин А. А.* Система поддержки принятия решения в прогнозировании и диагностике инфицированного панкреонекроза / *А. А. Литвин, О. Г. Жариков, В. А. Ковалев* // Врач и информационные технологии. – 2012. – № 2. – С. 54–63.
2. *Novel A.* Method for Diagnosing Carcinoma in Patients with Chronic Hepatitis B: Artificial Neural Network Approach / *Mohammad, Reza Raoufy, Parviz Vahdani, Seyed Moayed Alavian, Sahba Fekri, Parivash Eftekhari, Shahriar Gharibzaden* // *Journal of Medical System.* – 2011. – № 1 (35). – P. 121–126.
3. *Краснопоясовський А.С.* Інформаційний синтез інтелектуальних систем керування: Підхід, що ґрунтується на методі функціонально-статистичних випробувань / *А. С. Краснопоясовський* // Суми: Вид-во СумДУ, 2004. – 261 с.
4. *Dovbysh A. S.* Information-extreme algorithm for recognizing current distribution maps in magnetocardiography / *A. S. Dovbysh,*

- S. S. Martynenko, A. S. Kovalenko, N. N. Bydnyk* // *Journal of automation and information sciences.* – 2011 – 43 (2) – P. 63 – 70.
5. *Довбиш А. С.* Основи проектування інтелектуальних систем: навч. посібник / *А. С. Довбиш.* Суми : Вид-во СумДУ, 2009 – С.171.

References (transliterated)

1. *Lytvyn A. A., Zharykov O. G., Kovalev V. A.* Systema podderzhky prynyatiya resheniya v prognozyrovaniyu y dyagnostyke ynfycyrovannogo pankreonekroza [Decision support system in forecasting and diagnosis of infected pancreatic necrosis]. *Vrach y ynfomacyonnye tehnologi.* 2012, no. 2, pp. 54–63.
2. *Novel A.* Method for Diagnosing Carcinoma in Patients with Chronic Hepatitis B: Artificial Neural Network Approach. *Journal of Medical System.* 2011, no. 1 (35), pp. 121–126.
3. *Krasnopoyasovskiy A. S.* *Informatsionnyy sintez intelektualnykh system keruvannya: Pidxid, shho ґruntuyetsya na metodi funktsionalno-statystychnykh vyprobuvan* [Information synthesis of intelligent control systems: An approach based on the method of functional and statistical tests]. Sumy, SumDU Publ., 2004. 261 p.
4. *Dovbysh A. S., Martynenko S. S., Kovalenko A. S., Bydnyk N. N.* Information-extreme algorithm for recognizing current distribution maps in magnetocardiography. *Journal of automation and information sciences.* 2011, no. 43 (2), pp. 63–70.
5. *Dovbysh A.S.* *Osnovy proektuvannya intelektualnykh system: navch. posibnyk* [Fundamentals of Intelligent Systems]. Sumy, SumDU Publ., 2009. 171 p.

Надійшла (received) 28.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнаванні при машинному навчанні / В. О. Дрофа // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 29–33. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Оптимизация контрольных допусков на признаки распознавания при машинном обучении / В. А. Дрофа // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Системный анализ, управление и информационные технологии. – X.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 45 (1217). – С. 29–33. – Библиогр. : 5 названий. – ISSN 2079 0023.

Optimization control tolerances for signs of recognition in machine learning / V. A. Drofa // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 29–33. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дрофа Вікторія Олександрівна – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми; тел.: (096) 653-55-69; e-mail: brviktoriya@yahoo.com.

Дрофа Виктория Александровна – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумской государственной университет, г. Сумы, тел.: (096)) 653-55-69; e-mail: brviktoriya@yahoo.com.

Drofa Victoria A. – graduate student Computer Science Department, Sumy State University, Sumy; tel. : (096) 653-55-69; e mail: brviktoriya@yahoo.com.

В. В. МОСКАЛЕНКО, Н. Г. ФОНТА

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ENTERPRISE PERFORMANCE MANAGEMENT С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИИ КАСКАДИРОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Наведено технологію каскадування стратегічних показників і обґрунтування включення її як окремих модулів в систему Enterprise Performance Management. Сформувано задачу стратегічного розвитку і представлена структура програми розвитку підприємства. Представлено структуру ЕРМ-системи. В рамках ЕРМ-системи описані підсистеми стратегічного планування та каскадування. Розглянуто питання використання ETL-технологій при побудові ЕРМ-системи, визначено задачі, які вирішуються при проектуванні процесів перетворення даних.

Ключові слова: стратегічне управління, ключові показники діяльності, каскадування, бюджетування, ЕРМ-система, ETL-технології.

Приведена технология каскадирования стратегических показателей и обоснование включения её как отдельный модуль в систему Enterprise Performance Management. Сформирована задача стратегического развития и представлена структура программы развития предприятия. Представлена структура ЕРМ-системы. В рамках ЕРМ-системы описаны подсистемы стратегического планирования и каскадирования. Рассмотрены вопросы использования ETL-технологий при построении ЕРМ-системы, определены задачи, которые решаются при проектировании процессов преобразования данных.

Ключевые слова: стратегическое управление, ключевые показатели деятельности, каскадирование, бюджетирование, ЕРМ-система, ETL-технологии.

The technologies of cascading for the strategic indicators and substantiation of its inclusion as a separate module in the Enterprise Performance Management system were performed. Strategic task of elaboration was formed and the structure of program of the enterprise development was represented. The concept for technology of cascading of the key performance indicators on the enterprise is described. Separation of key performance indicators to the operating, investing and financing activities are invited to consider in the process of cascading. The structure of EPM-system is presented. The subsystems for strategic planning and cascading are described as the parts of the EPM-system. The modules that determines the performance of business processes operating, investing and financing activities and the module that calculates the performance indicators of these activities are included in the cascading subsystem. The problem of the using of the ETL-technologies for constructing EPM-system was resolved, tasks that are solved with the design of the data conversion process, were determine. Particularities of the ETL-tools using for the being developed EPM-system were allocated.

Keywords: strategic management, key performance indicators, cascading, budgeting, EPM-system, ETL-technology.

Введение. На основе проведённого анализа взглядов, мнений, научных теорий и практического опыта бизнеса по вопросам стратегического управления, можно сделать вывод, что данный процесс является итерационным, многогранным и требует больших усилий, он должен поддерживаться на всех этапах информационно и алгоритмически [1]. Стратегическое управление можно рассматривать как динамическую совокупность взаимозависимых управленческих процессов.

Основная проблема стратегического планирования – это реализуемость стратегических планов. Это связано с «разрывом» стратегического планирования с годовым, оперативным планированием и бюджетированием. Даже если стратегические показатели деятельности численно определены, то затруднительно определить конкретных исполнителей мероприятий по достижению плановых значений этих показателей, так как они представляют собой агрегированные, интегративные показатели, которые вычисляются на основе множества других показателей, характеризующих разные направления деятельности предприятия. Только немногие стратегические показатели могут быть однозначно отнесены к определённым центрам ответственности (исполнителям, подразделениям предприятия). Поэтому возникает «разрыв» между стратегическим управлением и оперативным.

Таким образом, собственники и руководство предприятия декларируют стратегические цели, ставят

стратегические планы, а вот достижимость целей и реализуемость планов чаще всего остаётся невыполнимой задачей [2].

Как показывает практика, наиболее перспективным направлением совершенствования системы стратегического управления в настоящее время является внедрение бизнес-ориентированного подхода, который базируется на системе ключевых показателей эффективности (KPI – Key Performance Indicators). Первым шагом для решения вышеописанной проблемы было сделано в рамках методики Системы сбалансированных показателей (ССП, англ. Balanced Scorecard – BSC) [3]. С помощью этой системы проводится оценка, анализ и планирование деятельности предприятия. Система показателей формируется на основе стратегической карты с точки зрения стейкхолдеров (stakeholder) – заинтересованных сторон, имеющих права, долю, требования или интересы относительно системы – предприятия или его свойств, удовлетворяющих их потребностям и ожиданиям (определение согласно стандартам ISO/IEC 15288:2008, ISO/IEC 29148:2011).

Можно использовать другой инструментарий формирования системы показателей деятельности на уровне стратегического управления, например, пирамида эффективности, Tableau de bord и т. д. [4].

Основная цель внедрения в систему стратегического управления методологии CCP – это не только создание стратегии и определение ключевых показателей, а постоянная поддержка работы системы и обеспечение её актуальными данными. Динамично разви-

вающийся бизнес требует отслеживать, фиксировать и анализировать все изменения, постоянно анализировать результаты реализации стратегий. А это невозможно без автоматизации этого процесса, т. е. без внедрения в работу специальных программ. Крупные производители платформ для разработки корпоративных информационных систем реализуют функции управления эффективностью в системах EPM (Enterprise Performance Management), например, Oracle EPM, Oracle Hyperion Planning, IBM Cognos Disclosure Management, SAP EPM, IBM Cognos FPM и т. д. Так как требования к таким программным системам постоянно возрастают, поэтому компании совершенствуют свои разработки за счет включения дополнительных функциональных модулей, изменяют алгоритмы решения управленческих задач и т. п.

На основе анализа функционала современных EPM-систем и предлагаемых программных решений, можно сделать вывод, что остаётся актуальной проблема интеграции системы стратегического управления в системы текущего, оперативного управления и бюджетирования.

Постановка задачи. Существует два подхода к автоматизации ССП: ССП как информационная система и ССП как система стратегического управления (самообучающаяся экспертная система) [4]. Мировые стандарты качества в области программного обеспечения для ССП определяет компания Balanced Scorecard Collaborative, Inc. (BSCol, <http://www.bscol.com>), созданная авторами концепции Balanced Scorecard Р. Капланом (Kaplan, R. S.) и Д. Нортонем (Norton, D. P.).

Цель программы стандартов – обеспечить переход разработчиков ПО сбалансированных систем показателей от простой «панели индикаторов» менеджера к инструментальным средствам, которые можно применять для внедрения и управления стратегией [5].

В BSC Functional Standards выражены требования и потребности пользователей, сформулированные на основании опыта сотрудничества компании BSCol с более чем 300 клиентами. Этот опыт систематизирован и кодифицирован в функциональных стандартах, которые стали руководством для организаций, которые используют BSC-приложение. Кроме того, BSC Functional Standards служат точкой отсчёта для разработчиков и поставщиков BSC-решений. Сертифицированные программные BSC-решения и инструментальные средства нового поколения отражают переориентацию на стратегическое управление. Постоянно добавляются различные модули, например, возможности перемещения вниз по иерархии детализации данных (drill-down) и интерактивной аналитической обработки (OLAP – On-Line Analytical Processing). Ведущие разработчики интегрировали в свои приложения интерактивную карту стратегии. Такая карта предоставляет ответственным менеджерам доступ ко всем возможностям OLAP.

Международным сертификатом BSCol Certified, подтверждающим соответствие продукта методологии Balanced Scorecard, обладают более 20 программных

решений со всего мира, например, Oros Scorecard (ABC Technologies, приобретена SAS); CorManage (CorVu); Crystal Decisions Balanced Scorecard (Crystal Decisions); FlexBI (FlexBI Technology); Hyperion Performance Scorecard (Hyperion Solutions Corp.); Performance Plus (InPhase Software); Oracle Balanced Scorecard (Oracle); Pviews (Panorama Business Views); PeopleSoft Balanced Scorecard (PeopleSoft); QPR Scorecard (QPR); SAP SEM (SAP AG) и SAS Solution for Balanced Scorecard (SAS Institute); Strategos (Vision Grupo Consultores) и т. д.

Совершенствование этих систем осуществляется в направлении их интеграции с системами оперативного планирования и бюджетирования [6, 8].

Пока не предложено чёткого механизма объединения в единую систему стратегических показателей эффективности и показателей оперативной деятельности. В последнее время эта задача решается совместно с каскадированием системы ключевых показателей деятельности предприятия. Чаще всего под каскадированием понимается построение стратегических карт дерева целей для структурных подразделений предприятия [7].

На основе проведённого анализа проблем каскадирования были сделаны выводы, что не до конца проработан вопрос отнесения того или иного стратегического показателя предприятия к определённому подразделению (или центру ответственности), нет методологии определения плановых значений стратегических показателей подразделений и ключевых сотрудников, в том числе и значений этих показателей по годам. Трудность заключается в том, что системы годового планирования, бюджетирования, управленческого и бухгалтерского учёта построены на других принципах нежели стратегическое планирование, т. е. другая классификация показателей и ответственных за выполнение, другие цели и измерители [8].

Поэтому необходимо разработать такую технологию (механизм) каскадирования ключевых показателей деятельности, который будет осуществлять декомпозицию стратегических показателей до годовых показателей и показателей бюджетов. Эта технология должна быть реализована в виде отдельного модуля EPM системы. Разрабатываемый модуль должен быть интегрирован с системой оперативного учёта и системой бюджетирования.

Концепция технологии каскадирования ключевых показателей деятельности предприятия. Стратегическое планирование ориентируется на агрегированные показатели и на достижение их плановых значений через определённое количество лет, т. е. на стратегический период. А в основе оперативного планирования и учёта лежит деление деятельности предприятия на основную (операционную), инвестиционную и финансовую на принципах учёта затрат и доходов на коротких промежутках времени – месяц, квартал, год. Поэтому предлагается при разработке механизма каскадирования учитывать эту специфику.

Предварительно перед построением стратегических карт структурных подразделений осуществить декомпозицию стратегических показателей на показатели основной, инвестиционной и финансовой деятельности [2, 9]. Далее провести декомпозицию этих показателей по интервалам, т. е. определить их плановые годовые значения по всем интервалам стратегического периода. Затем приступить к каскадированию по

структурным подразделениям, которые реализуют операционную, инвестиционную и финансовую деятельность.

Предлагаемая технология каскадирования стратегических показателей представлена на рис. 1. Здесь каскадирование рассмотрено до момента определения показателей структурных подразделений и исполнителей.

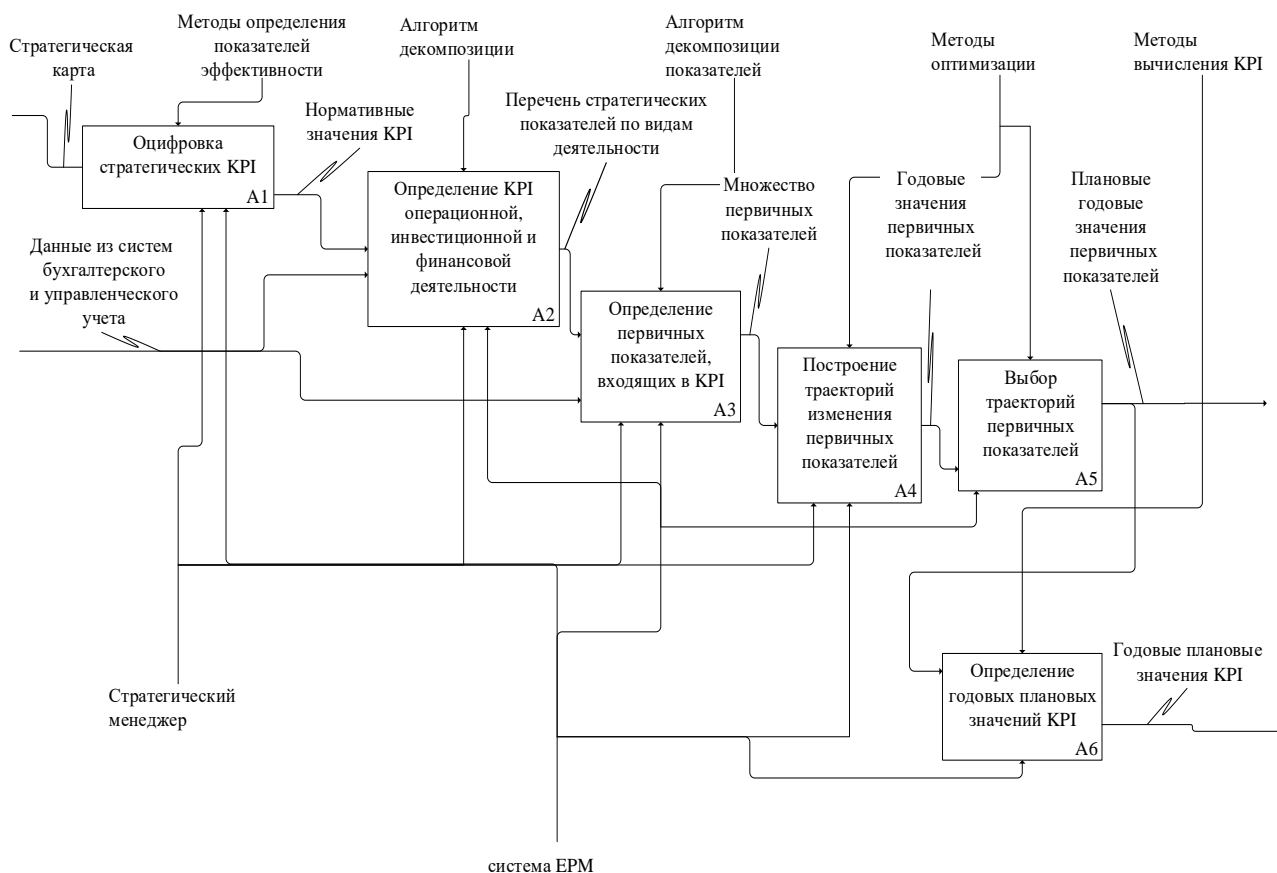


Рис. 1 – Технология каскадирования стратегических показателей

Исходя из вышесказанного, задачу стратегического развития можно сформулировать так: для достижения стратегических целей необходимо определить множество показателей эффективности предприятия и соответствующие их численные значения на интервалах стратегического периода. Это множество будет включать показатели, характеризующие основную, инвестиционную и финансовую деятельности предприятия. Выполнение плановых значений этих показателей будет соответствовать достижению численных значений стратегических KPI [9].

Тогда программа развития предприятия должна включать:

- стратегические цели предприятия,
- годовые планы предприятия (плановые годовые значения ключевых показателей деятельности предприятия, плановые показатели деятельности центров ответственности, которые реализуют основную, инвестиционную и финансовые деятельности предприятия, по го-

дам и выделяемые денежные ресурсы для достижения этих плановых показателей);

- инвестиционный портфель проектов развития, который формируется на основе определённой инвестиционной политике предприятия;
- финансовый план развития (планы финансирования программы развития предприятия по годам).

Структура EPM-системы. EPM – это интегрированный комплекс бизнес приложений поддержки процессов управления эффективностью, который обеспечивает связку стратегического контура планирования, целей с контуром тактического и оперативного планирования, осуществляет мониторинг исполнения действий реализации стратегической программы и бизнес-плана, поддерживает весь цикл управления, охватывающий процессы формирования целей, стратегических карт, ключевых показателей эффективности, моделирование сценарных прогнозов,

планирование, мониторинг анализ и формирование отчётов финансовых и операционных результатов [9].

Управление эффективностью бизнеса должно охватывать сразу множество сфер внутренней информационной системы, среди которых:

- отдельные средства планирования;
- инструменты Business Intelligence;
- средства поддержки принятия решений;
- системы сбалансированных показателей;
- приложения консолидации данных и генерации отчётов.

Выделяют следующие инфраструктурные компоненты EPM системы [2]:

1. Инфраструктура данных – средства интеграции и построения хранилища данных.
2. Аналитическая инфраструктура – средства анализа данных, подготовки отчётности, интеграции с офисными приложениями, средства мониторинга деятельности в реальном времени, приложения data mining и т. д.
3. IT-инфраструктура – это объединение серверов, средств хранения, сетей, операционной системы, межплатформенного программного обеспечения и т. д.

Предлагается внести в аналитическую инфраструктуру модуль, который бы реализовывал технологию каскадирования (рис. 2.).

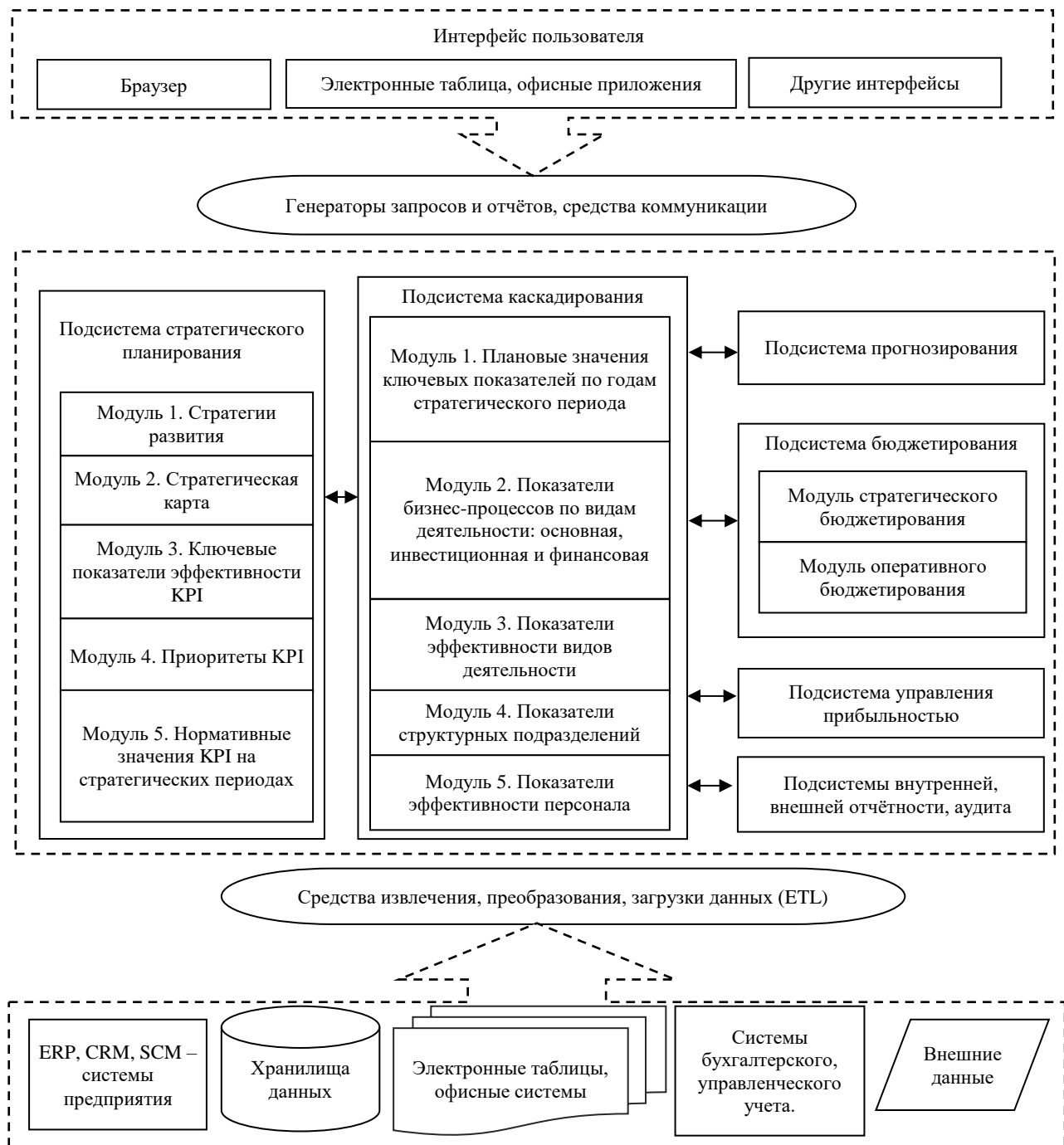


Рис. 2 – Структура EPM-системы с модулями каскадирования KPI

Модули каскадирования объединяются в отдельную подсистему, что позволит вносить коррективы в алгоритмы, которые реализованы в этих модулях.

Подсистема стратегического планирования должна содержать модули формирования стратегий, модуль построения стратегической карты с элементами визуализации и соответствующими алгоритмами построения иерархий показателей, а также отдельные модули формирования стратегических KPI, определения их важности (приоритетов) и нормативных значений на стратегическом периоде. В результате работы данной подсистемы будет сформирован стратегический план, который затем подлежит декомпозиции до годовых планов с помощью реализации модулей подсистемы каскадирования.

Систему бюджетирования необходимо рассматривать на двух уровнях: на стратегическом и оперативном. Оперативный уровень – это традиционная система бюджетирования, которая охватывает временной интервал равный одному году. Здесь предлагается строить бюджеты на первый год (или несколько первых лет) стратегического периода на основе прогнозных данных и данных каскадирования, а вот стратегический уровень бюджетов охватывает более поздние года стратегического периода и их необходимо строить на других принципах. Вопросы построения годовых и стратегических бюджетов с учётом технологии каскадирования будут освещены в дальнейших работах авторов.

Основная проблема внедрения систем уровня стратегического управления, например, таких как EPM-систем – это их интеграция с системами тактического, текущего и оперативного управления, с

системой бюджетирования. Как отмечено выше, эти процессы на стадии разработки алгоритмического обеспечения решаются с помощью технологий каскадирования.

На стадии разработки информационного и программного обеспечения для связи с другими информационно-аналитическими системами используют ETL-технологии. ETL (Extract, Transform, Load) – это системы корпоративного класса, которые применяются, чтобы привести к одним справочникам и загрузить в DWH (Datawarehouse – хранилище данных) и EPM данные из нескольких разных учётных систем [10, 11]. В разрезе потока данных это несколько систем-источников (обычно OLTP – Online Transaction Processing), транзакционная система – обработка транзакций в реальном времени) и система приёмник (обычно OLAP), а также пять процессов преобразования данных между ними (рис. 3.):

- **Извлечение.** Данные извлекаются из источников и загружаются в промежуточную область.
- **Поиск ошибок.** Производится проверка данных на соответствие спецификациям и возможность последующей загрузки в ХД.
- **Преобразование.** Данные группируются и преобразуются к виду, соответствующему структуре ХД.
- **Распределение.** Данные распределяются на несколько потоков в соответствии с особенностями организации процесса их загрузки в ХД.
- **Вставка.** Данные загружаются в хранилище-получатель.

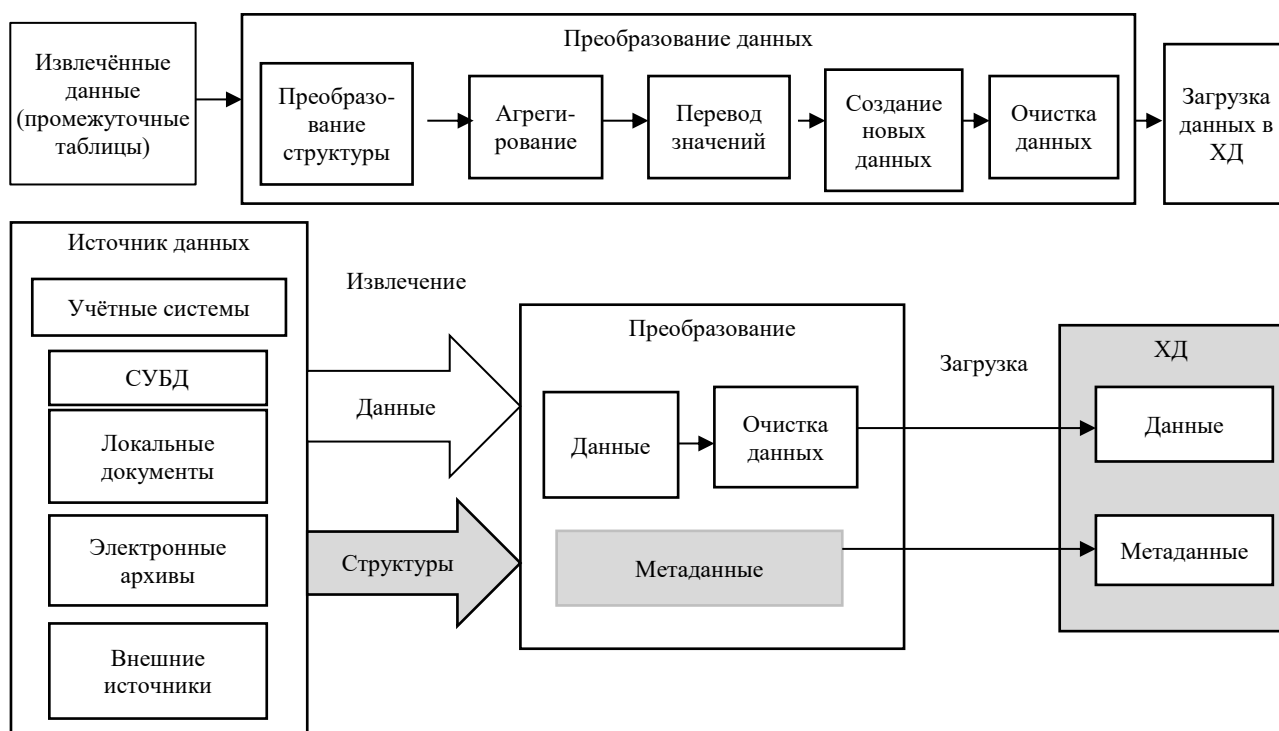


Рис. 3 – Стадии преобразования данных с помощью ETL [11].

Разработка ETL-процесса включает в себя следующие основные стадии:

- планирование ETL-процесса;
- конструирование процесса заполнения таблиц измерений;
- конструирование процесса заполнения таблиц фактов;
- извлечение данных;
- преобразование и очистка данных;
- загрузка данных.

При проектировании процессов преобразования данных решаются следующие задачи:

- анализ требований к данным;
- анализ и описание всех источников данных;
- создание модели преобразования данных высокого уровня;
- определение и описание каждой задачи преобразования данных.

Ведущие компании, производители комплексных решений для создания ХД и ЕРМ-систем, такие как IBM, Oracle, MicroSoft и ряд других, поставляют встроенные средства для проектирования ETL-процессов. Поэтому при разработке ЕРМ-систем необходимо учитывать возможности таких инструментов после выбора основной СУБД.

Особенности применения ETL-средств для разрабатываемой ЕРМ-системы:

- большое число разнотипных источников данных (системы бухгалтерского учета и управленческого учета, системы маркетингового планирования и планирование операционной деятельностью, системы управления бизнес-процессами и т. д.;
- разнообразие, множественность моделей преобразования данных;
- большое количество задач по преобразованию данных стратегического, тактического и текущего планирования, данных бюджетов и т. д.

Выводы. В результате проведенных исследований были сделаны выводы о необходимости при каскадировании стратегических ключевых показателей эффективности предприятия определять ключевые показатели основной, инвестиционной и финансовой деятельности. Предложенная технология каскадирования должна быть реализована в рамках подсистемы ЕРМ-системы предприятия. Рассмотрена структура ЕРМ-системы.

Таким образом, результаты, приведенные выше, являются основой для проектирования ЕРМ-системы. В дальнейшей работе будут:

- рассмотрены вопросы выбора платформы для программной реализации ЕРМ-системы,
- исследованы архитектурные особенности программной реализации ЕРМ-системы,
- разработана архитектура ЕРМ-системы,
- спроектированы элементы ETL-процесса,
- рассмотрены вопросы интеграции ЕРМ-системы с информационно-аналитическими системами предприятия.

Список литературы

1. Mintzberg H. The Strategy Process / H. Mintzberg, J. B. Quinn. – Harlow : Prentice-Hall, 1988. – 493 p.
2. Москаленко В. В. Технология формирования показателей эффективности как основа ЕРМ-системы предприятия. / В. В. Москаленко, Н. Г. Фонта // Информационные технологии в управлении, образовании, науке и промышленности: монография / под ред. В. С. Пономаренко. – Х. : Издатель Рожко С. Г., 2016. – С. 476–490.
3. Каплан Р. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты / Р. Каплан, Д. П. Нортон. – М. : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. – 512 с.
4. Богуславская С. Б. Системное стратегическое управление компанией: подходы и этапы постановки / С. Б. Богуславская. – СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. – 170 с.
5. Мияке Д. Balanced Scorecard. По ту сторону чисел. Crystal Decisions Balanced Scorecard / Д. Мияке – Режим доступа : http://bigspb.ru/publications/other/strategy/bsc_inside_number.php. – Дата обращения: 17 ноября 2016.
6. Нивен П. Р. Диагностика сбалансированной системы показателей: Поддерживая максимальную эффективность / П. Р. Нивен. – Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2006. – 251 с.
7. Внедрение сбалансированной системы показателей / Horvath & Partners. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 478 с.
8. Вихров А. А. Интеграция систем КР/БС и бюджетирования в единый инструмент управления / А. А. Вихров, П. А. Лекомцев // Управление компанией. – 2005. – № 10(53). – С. 15 – Режим доступа : http://iteam.ru/publications/finances/section_12/article_2634. – Дата обращения: 15 ноября 2016.
9. Москаленко В. В. Технология формирования программы развития как системы годовых планов предприятия на основе ключевых показателей деятельности / В. В. Москаленко, Т. В. Захарова, Н. Г. Фонта // European cooperation Scientific Approaches and Applied Technologies. – Варшава, – 2015. – Vol. 2(2). – С. 108–124.
10. Мокрышев А. Основные функции ETL-систем / А. Мокрышев // Хабрахабр: Разработка, 19 января 2015. – Режим доступа : <https://habrahabr.ru/post/248231>. – Дата обращения: 18 ноября 2016.
11. Паклин Н. Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям / Н. Б. Паклин, В. И. Орешков. – СПб. : Питер, 2013. – 704 с.

References (transliterated)

1. Mintzberg Henry, Quinn James B. *The Strategy Process*. Harlow : Prentice-Hall, 1988. 493 p.
2. Moskalenko V. V., Fonta N. G. *Tekhnologiya formirovaniya pokazateley effektivnosti kak osnova EPM-sistemy predpriyatiya*. [Technology of formation of performance indicators as a basis for EPM – system of enterprise]. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii, obrazovanii, nauke i promyshlennosti: monografiya* [Information, technologies in management, education science and industry]. Kharkiv, Izdatel' Rozhko S. G. Publ., 2016. pp. 476–490.
3. Kaplan, Robert S., David P. Norton. *Strategy Maps: Converting Intangible Assets into Tangible Outcomes*. Harvard Business School Press, 2004. 324 p. (Rus. ed.: Kaplan R., Norton D. P. *Strategicheskie karty. Transformatsiya nematerial'nykh aktivov v material'nye rezul'taty*. Moscow, ZAO «Olimp-Biznes» Publ., 2005. 512 p.).
4. Boguslavskaya S. B. *Sistemnoe strategicheskoe upravlenie kompaniy: podkhody i etapy postanovki* [System of strategic management of the company: approaches and setting stages]. Saint Petersburg, Izd-vo Politekhn. Un-ta Publ., 2011. 170 p.
5. Miyake D. *Balanced Scorecard. Po tu storonu chisel. Crystal Decisions Balanced Scorecard* [Balanced Scorecard. Beyond the numbers. Crystal Decisions Balanced Scorecard]. Available at: http://bigspb.ru/publications/other/strategy/bsc_inside_number.php. (accessed 17.11.2016).
6. Niven P. R. *Diagnostika sbalansirovannoy sistemy pokazateley: Podderzhivaya maksimal'nuyu effektivnost'* [Diagnosis of Balanced Scorecard: Supporting maximum efficiency]. Dnepropetrovsk, Balans Biznes Buks Publ., 2006. 251 p.

- Balanced Scorecard Umsetzen von Horvath & Partners*. Stuttgart Schaeffer-Poeschel Verlag, 2004. 480 p (Rus. ed.: Vnedrenie sbalansirovannoy sistemy pokazateley. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2005. 478 p.).
8. Vikhrov A. A. *Integratsiya sistem KPI/BSC i byudzhetrovaniya v edinyi instrument upravleniya* [Integration of KPI systems / BSC and budgeting in a single management tool]. Available at: http://iteam.ru/publications/finances/section_12/article_2634. (accessed 15.11.2016).
9. Moskalenko V. V., Zakharova T. V., Fonta N. G. *Tekhnologiya formirovaniya programmy razvitiya kak sistemy godovykh planov predpriyatiya na osnove klyuchevykh pokazateley deyatelnosti* [Technology of formation of the program as a system of annual enterprise plans based on key performance]. *European cooperation Scientific Approaches and Applied Technologies*. Varshava Publ., 2015, Vol. 2(2). pp. 108–124.
10. Mokryshev A. *Osnovnye funktsii ETL-sistem* [Main features ETL-systems]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/248231>. (accessed 18.11.2016).
11. Paklin N. B., Oreshkov V. I. *Biznes-analitika: ot damnykh k znaniyam* [Business Intelligence: from data to knowledge]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2013. 704 p.

Поступила (received) 24.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Структура системи Enterprise Performance Management з урахуванням технології каскадування ключових показників діяльності / В. В. Москаленко, Н. Г. Фонта // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 34–40. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0023.

Структура системы Enterprise Performance Management с учётом технологии каскадирования ключевых показателей деятельности / В. В. Москаленко, Н. Г. Фонта // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 34–40. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0023.

Structure of Enterprise Performance Management System that takes into account the technology of the cascading of key performance indicators / V. V. Moskalenko, N. G. Fonta // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 34–40. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Москаленко Валентина Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (067) 715-87-12; e-mail: mvv_17@mail.ru.

Москаленко Валентина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (067) 715-87-12; e-mail: mvv_17@mail.ru.

Moskalenko Valentina Volodymyrovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (067) 715-87-12; e-mail: mvv_17@mail.ru.

Фонта Наталія Григорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (099) 412-64-23; e-mail: nataliya-fonta@yandex.ru.

Фонта Наталья Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (099) 412-64-23; e-mail: nataliya-fonta@yandex.ru.

Fonta Natal'ya Grigor'yevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (099) 412-64-23; e-mail: nataliya-fonta@yandex.ru.

УДК 519.2: 658.5.011

С. В. ШЕВЧЕНКО

О ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВА ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Розглядаються структура і зміст основних задач інтелектуальної системи управління в електроенергетичній системі. Використовується ієрархія функцій управління, виділені цілі рівнів управління, на основі яких можуть бути побудовані задачі управління та функціональні підсистеми, що забезпечують їх рішення. Ідентифікація функціональних залежностей задач управління, координація та узгодження умов їх спільного вирішення можуть бути використані для побудови і вдосконалення інтелектуальної підсистеми управління електроенергетичною системою та їх об'єднаннями.

Ключові слова: електроенергія, енергосистема, завдання управління, критерій, модель, оптимізація, підсистема управління.

Рассматриваются структура и содержание основных задач интеллектуальной системы управления в электроэнергетической системе. Используется иерархия функций управления, выделены цели уровней управления, на основе которых могут быть построены задачи управления и функциональные подсистемы, обеспечивающие их решение. Идентификация функциональных зависимостей задач управления, координация и согласование условий их совместного решения могут быть использованы для построения и совершенствования интеллектуальной подсистемы управления электроэнергетической системой и их объединениями.

Ключевые слова: электроэнергия, энергосистема, задачи управления, критерий, модель, оптимизация, подсистема управления.

Market relations in electric power industry define necessity of operative decision-making in the conditions of unpredictable changes of an environment and the concomitant factors influencing processes of manufacture of the electric power, its distribution and use. The structure and the maintenance of the primary goals of an intellectual control system in a power system is considered. The hierarchy of functions of management is used, the purposes of levels of management on which basis problems of management and the functional subsystems providing their decision can be constructed are allocated. Identification of functional dependences of problems of management, coordination and the harmonization of conditions of their joint decision can be used for construction and improvement of an intellectual subsystem of management by a power system and their associations. All problems of management can be distributed on several levels of hierarchy, creating conditions for perfection and development of a subsystem of management. Intellectuality of subsystems of management SMART GRID is supported by possibilities of the account of various situations and events which can arise in practice, and its efficiency - efficiency of acceptance adequate decisions. In job the structure and the maintenance of problems of intellectual control systems in a power system, and also questions of expansion of their structure and formalization of conditions of the decision for increase of general efficiency of management is considered.

Keywords: electricity, power system, control objectives, criteria, model, optimization, management subsystem.

Введение. Рыночные отношения в электроэнергетике определяют необходимость оперативного принятия решений в условиях непредсказуемых изменений внешней среды и сопутствующих факторов, влияющих на процессы производства электроэнергии, ее распределения и использования. Для этого необходимо рассмотреть возможность построения и включения в состав решаемых задач новых функций и процедур управления, их координацию и согласование, которые позволят повысить общую эффективность управления в электроэнергетике.

Все задачи управления могут быть распределены по нескольким уровням иерархии, создавая условия для совершенствования и развития подсистемы управления. Интеллектуальность подсистем управления SMART GRID поддерживается возможностями учета различных ситуаций и событий, которые могут возникнуть на практике [1–3], а ее эффективность – оперативностью принятия адекватных решений. В связи с этим основным направлением развития систем SMART GRID можно считать создание условий для более полной автоматизации решения задач управления энергосистемой на разных уровнях, включая управление производством, распределением, поставками и потреблением электроэнергии, и позволяющих обеспечить надежность функционирования, требуемое качество электроэнергии, развитие производственной базы, средств контроля и управления, а также самой управляющей подсистемы. Для этого необходимо определить способы преобразования функций управ-

ления в автоматические решения с обеспечением адекватности принимаемых решений на основе повышения достоверности идентификации возникающих ситуаций, используемых функциональных зависимостей, получения достоверных прогнозных значений внешних факторов и параметров функционирования, построения и внедрения новых задач управления в электроэнергетической системе

В состав этих задач, наряду с задачами оперативного и диспетчерского управления, должны входить задачи повышения эффективности и качества управления. Это задачи расширения и совершенствования функций диспетчерского управления, формирования процедур управления рыночными механизмами ценового и тарифного регулирования соотношений спроса и предложений, задачи вышестоящих уровней управления, перспективного планирования и др.

Подобные вопросы рассматривались в работах [1–3], но формирование целостной стратегии организации эффективного управления с применением интеллектуальных технологий в электроэнергетике рассмотрены не полностью.

В работе рассматривается структура и содержание задач интеллектуальных систем управления в электроэнергетической системе, а также вопросы расширения их состава и формализации условий решения в целях повышения общей эффективности управления.

Постановка задачи. Условия рыночной экономики в электроэнергетике предъявляют высокие тре-

бования к обоснованности и оперативности принимаемых решений. Процесс поиска приемлемого решения усложняется необходимостью использования ряда критериев эффективности, включающих минимум затрат на выполнение договорных обязательств по поставке потребителям заданных объемов электроэнергии в заданные сроки, поддержку требуемых значений надежности выполнения договорных обязательств, обеспечение заданного уровня качества электроэнергии и др. Приоритетность плановых заданий и критериев эффективности формируется текущими и ожидаемыми обстоятельствами.

Вопросы повышения эффективности управления в электроэнергетике, требования оперативности и многовариантности формируемых решений приводят к необходимости разработки высокопроизводительных алгоритмов, позволяющих в реальном масштабе

времени создавать множество эффективных решений, учитывающих динамические особенности объектов управления разных уровней и оценивать полученные варианты с позиций выбранных критериев. Анализируемые варианты решений включают формирование распределения производства электроэнергии между генерирующими компаниями и их энергоблоками в виде планов-графиков нагрузки для каждого производителя, энергоблоков и поставщиков. Помимо этого, все процессы планирования и оперативного управления должны увязываться в единую систему в соответствии с принимаемой иерархией процессов управления [4].

Формирование общей схемы решения. Структура взаимодействия производственных процессов, бизнес-процессов и процессов управления может быть представлено следующим образом, рис. 1.

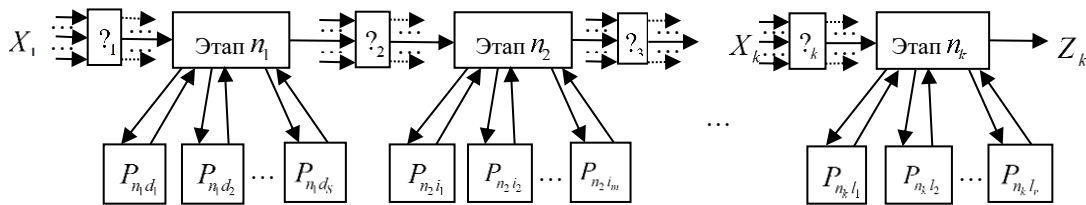


Рис. 1 – Формирование структуры процессов производства и управления

На рисунке X_i – подмножество значений внешних и внутренних факторов, инициирующих выполнение i -го этапа производственной деятельности. Блоки, обозначенные символами $?_i$, представляют собой блоки вывода в виде совокупности решающих правил, с помощью которых определяются выполняемые этапы производства и потребления $n_i, i = \overline{1, k}$, рассматриваемые в дальнейшем как объекты управления.

Каждый такой i -й этап (объект) представляется некоторой совокупностью процессов

$$\{P_{n_i m_i}\}, n_i \in N_i, m_i \in M_i, i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

в которую могут входить бизнес-процессы, процессы организации производства, непосредственно производственные или технологические процессы в виде последовательности операций создания выпускаемой продукции, процессы распределения, поставок и потребления, а также процессы управления в рыночных условиях.

Результатом взаимодействия рассматриваемых процессов является некоторый промежуточный или конечный продукт с характеристиками $Z_i, i = \overline{1, k}$.

Решающие правила могут быть представлены совокупностью логических условий, выполнение которых связывается с инициализацией выполнения соответствующего этапа и/или его компонент в составе общего процесса создания конечного продукта, его последующего распределения, поставок и потребления.

Приведенная структура процессов управления в производственной деятельности может быть использована для интерпретации процессов управления произвольных производственных, технологических и бизнес-процессов разных уровней иерархии [4].

В качестве универсальной части приведенной структуры производственной деятельности может быть использовано взаимодействие блока вывода на основе решающих правил, блока инициализации и управления выполнением соответствующего этапа производственного плана с совокупностью технологических процессов.

Результаты такого взаимодействия представляют собой или некоторый промежуточный продукт в цепочке спрос–производство–распределение–поставки–потребление, или готовую продукцию у конечного потребителя.

Среди решающих правил разных уровней управления можно выделить группу правил инициализации выполнения соответствующих этапов и группу правил диагностики текущего или ожидаемого состояния объекта управления, которые используются для принятия соответствующих решений и последующей инициализации процедур управления.

Правила первой группы отражают связь внешних и внутренних факторов, влияющих на процессы функционирования объекта управления, и условий, которые в совокупности определяют необходимость выполнения задач управления в составе некоторого этапа. Данные правила могут быть представлены в виде некоторой логической функции, например, в виде дизъюнкции логических выражений, каждое из

которых определяет одно из условий выполнения заданной функции управления.

Тогда для этой группы состояний i -го объекта управления инициализация решения соответствующих задач управления определяется следующим выражением

$$F_i = \bigvee_{j=1}^{n_i} Q_{ij} (X_i, Y_{ij}) = 1, \quad i = \overline{1, k}, \quad (2)$$

где X_i – вектор значений внешних и внутренних факторов для i -го этапа;

Y_{ij} – вектор параметров j -го процесса i -го этапа.

Правила второй группы базируются на оценке вероятности текущего состояния объекта управления и обеспечению его перехода в некоторое целевое состояние. Для этого необходимо обеспечить формирование управляющих воздействий в соответствии с изменением состояния объекта управления.

Для этих целей помимо существующих значений внешних и внутренних факторов могут использоваться тенденции их изменения, а также прогнозные значения на некоторый период времени, связанный с будущим целевым состоянием объекта управления.

Поскольку идентификация текущего и будущего состояния объекта управления сопряжена с учетом неопределенности ряда его параметров и характеристик, обусловленной сложностью получения адекватных оценок, влиянием на объект управления процессов изменения внешних и внутренних факторов в предстоящем периоде, возникает необходимость формирования критерия оценки состояния, постановки и решения задачи диагностики объекта управления.

Будем считать возможным формирование открытого множества $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i\alpha_i}\}$, элементы которого $S_{ij} \in S_i$ представляют j -е состояние i -го объекта управления, $j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$. Данные состояния в общем случае могут быть представлены в виде иерархии состояний с добавлением новых элементов, более точно описывающих возможные состояния и определяющих условия выполнения заданных функций управления.

Тогда задачу диагностики состояния i -го объекта управления можно представить в виде задачи классификации текущего состояния на основе определения зависимости между параметрами i -го объекта управления и параметрами известных его состояний в целях выбора одного из них для идентификации и выполнения функций управления в текущий момент времени. В такой постановке для решения данной задачи необходимо выбрать меру расстояния и построить процедуру его определения $r_{ij}(\cdot)$ в пространстве значений параметров состояния объекта диагностики среди классов $S_{ij} \in S_i$, $j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$, при условии обеспечения требуемой адекватности получаемых выводов.

Тогда состояние $S_{i\beta} \in S_i$, для которого $r_{i\beta} = 0$, будет соответствовать текущему состоянию i -го объекта в соответствии с принятыми предположениями.

Для определения расстояний могут быть использованы известные меры такие, как Евклидова мера, мера Чебышева, Хеммингово расстояние, процент совпадений и ряд других [5]

Представляет интерес использование взвешенной Евклидовой меры, позволяющей учесть не только различия в значениях параметров, но и задать их уровни значимости в виде экспертных оценок для отдельных показателей при идентификации состояний объекта управления. Эти действия представляют собой механизм адаптации процедуры измерения расстояния к особенностям сравниваемых состояний. Тогда для оценки искомого расстояния может быть использовано средневзвешенное значение

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{j=1}^{\alpha_i} k_j (d_{ij} - y_{ij})^2}, \quad (3)$$

где k_j – весовой коэффициент для j -го параметр i -го объекта управления, $j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$;

d_{ij} – значение j -го параметра для состояния

$S_{ij} \in S_i$ i -го объекта управления, $j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$;

y_{ij} – значение j -го параметра для текущего состояния i -го объекта управления, $j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$.

При формировании возможных состояний объекта управления среди параметров, используемых для его описания, следует учитывать наличие числовых значений и их диапазонов, категориальных значений и их подмножеств, а также отсутствие, неизвестность или недостоверность имеющейся информации.

Логические блоки выбора и описания состояний объектов могут быть представлены базой знаний, обновляемой при появлении новых статистически достоверных данных и правил вывода. Данные обстоятельства приводят к необходимости разработки определенных процедур построения и обновления используемой информационной среды и базы знаний.

Если $r_{ij}(\cdot) > 0 \quad \forall j = \overline{1, \alpha_i}$, $i = \overline{1, k}$, то минимальное значение оценки расстояния

$$r_{i\beta} = \min_j r_{ij} \quad (4)$$

может служить оценкой степени близости текущего состояния i -го объекта к состоянию $S_{i\beta}$, $S_{i\beta} \in S_i$, либо использоваться для последующего обоснования необходимости идентификации нового состояния в составе множества S_i , $i = \overline{1, k}$.

Для оценки вероятности пребывания i -го объекта в состоянии $S_{i\beta}$ можно использовать значение

$$P_{i\beta} = 1 - r_{i\beta} / r_i^{cp}, \quad (5)$$

где $r_i^{cp} = \sum_{j=1}^{\alpha_i} r_{ij} / \alpha_i$.

В рамках принятых допущений формирование вывода относительно пребывания объекта управления в состоянии $S_{i\bar{k}}$, $S_{i\bar{k}} \in S_i$, может быть выполнено только с оценкой данной вероятности, например, с использованием указанного значения $P_{i\bar{k}}$, $i = \overline{1, k}$. При этом, если $0 < P_{i\bar{k}} < 1$, то, в общем случае, можно говорить или о тенденциях изменения состояния объекта, или о вероятности его перехода в соответствующее состояние.

С другой стороны, вероятное состояние может соответствовать текущему, поскольку полученные результаты могли быть получены при неполной информации или с использованием недостоверных (искаженных) значений анализируемых параметров. Поэтому для каждого состояния $S_{i\bar{k}} \in S_i$ i -го объекта, $i = \overline{1, k}$, необходимо определить значение доверительной вероятности P_{ij}^0 и, если $P_{ij}^0 \leq P_{ij}$, то можно считать, что возникают условия для инициализации и выполнения предусмотренных процедур управления для i -го этапа деятельности. При этом каждый блок вывода и решающих правил должен быть дополнен подсистемой мониторинга, обеспечивающей процессы анализа актуальной информацией о текущих значениях внешних факторов, параметрах и условиях функционирования рассматриваемого объекта управления. Указанные данные должны сохраняться в составе информационной базы системы управления для последующего анализа и использования в качестве статистической информации с возможным дальнейшим уточнением параметров состояний, идентификации и дополнения множества состояний новыми элементами с использованием новых процессов, решающих правил, задач управления и процедур решения.

В настоящее время в электроэнергетике интеллектуальное управление представлено системами SMART-GRID [1, 3], которые базируются на применении средств автоматики для поддержки надежности функционирования технических средств в энергосистеме и необходимого уровня качества генерируемой и поставляемой электроэнергии. Такие системы используют решения задач стабилизации частоты и уровня напряжения, определения требуемой мощности генерации, выполнения оперативных отключений и/или подключений оборудования.

Ряд функций, выполняемых на уровне подсистем автоматизированного диспетчерского управления (АСДУ) в отдельных энергосистемах и в составе системы Центрального диспетчерского управления (ЦДУ) Объединенной энергосистемы, направлены на формирование динамически изменяющегося уровня генерации, поставок и распределения электроэнергии в отдельных энергосистемах и объединенной энергосистеме в соответствии с плановым и текущим уровнями потребления, поддержку учета взаимодействия с соседними энергосистемами [5].

Решение подобных задач целесообразно выполнять с использованием многокритериальных и опти-

мизационных подходов, позволяющих получать эффективные решения с широким обоснованием принимаемых вариантов решений, адекватно отражающих влияние внешних и внутренних факторов. При этом наиболее важными критериями эффективности управления являются соблюдение договорных обязательств на поставку электроэнергии, обеспечение параметров, определяющих ее качество и стабильность, затраты на производство электроэнергии в требуемых объемах, надежность поставок.

Построение множества эффективных решений может быть выполнено с применением метода уступок по одному из критериев, например, по критерию, определяющему затраты на производство, распределение и поставку электроэнергии в соответствии с текущими планами и динамически изменяющимся спросом. При формировании данного множества использование в расчетах более дорогостоящих компонентов приводит, как правило, к улучшению значений критериев качества и надежности производства, распределения и поставок электроэнергии, но и вносящих большую стоимость в общие затраты по данному варианту решения с возможным уменьшением уровня эксплуатационных затрат.

Выполняя в ходе расчетов последовательную замену отдельных компонент производства, распределения и поставок электроэнергии на указанные варианты замещения, можно получить искомые элементы множества эффективных решений для последующего выбора решения, соответствующего поставленным целям, текущим или прогнозным условиям и требованиям. Подобные решения могут использоваться для формирования как оперативных решений, так и планов развития энергосистемы.

Периодичность решения задач управления зависит от ряда событий, среди которых следует выделить изменения во времени и в составе рыночных предложений параметров и характеристик производственных, технологических и бизнес-процессов. Наиболее динамичным параметрами, требующими оперативного учета при принятии решений, являются изменения значений нагрузки и спроса, создаваемой потребителями, доступность требуемых ресурсов, динамика изменений их характеристик, изменения стоимостных показателей, появление непредвиденных обстоятельств на всех этапах цепочки спрос–производство–распределение–поставки–потребление, которые нарушают условия функционирования энергосистемы, технические отказы, аварийные и форс-мажорные ситуации, последующие ремонты и восстановления.

Выводы. Использование интеллектуальных систем управления в электроэнергетике способствует повышению эффективности всех этапов производства, распределения, поставок и потребления электроэнергии. Автоматизация управления в электроэнергетике на разных уровнях, расширение состава и повышение качества выполняемых функций в режиме реального времени предполагает усовершенствование применяемых аппаратно-программных комплексов, систем учета ресурсов на всех этапах функционирования,

алгоритмов управління. Для этого необходимо выполнить постановку задачи проектирования, разработку и последующее сопровождение используемого информационного и программного обеспечения в составе систем SMART GRID, позволяющих формировать решения в рамках доступных ресурсов в соответствии с поставленными целями, адекватно отражающих текущие и прогнозируемые состояния взаимодействующих подсистем энергосистемы и внешней среды.

Предлагаемые механизмы формирования состава задач и новых состояний интеллектуальной системы управления способствуют расширению ее функциональности, адекватности и повышению эффективности управления, что особенно важно для энергетических компаний, использующих технологии управления SMART GRID в современных энергосистемах.

Список литературы

1. Smart Grids European Technology Platform. – Режим доступа : <http://www.smartgrids.eu>. – Дата обращения: 05 декабря 2016.
2. Костров Д. Умные сети электроснабжения [smart grid] и проблемы с кибербезопасностью / Д. Костров // Информационная безопасность. – 2014. – № 3. – С. 45–47.
3. Hurtado L. A. Smart grid and smart building inter-operation using agent-based particle swarm optimization / L. A. Hurtado, P. H. Nguyen, W. L. Kling // Sustainable Energy, Grids and Networks. – Vol. 2, June 2015. – pp. 32–40.
4. Шевченко С. В. Оптимизация управления производственными системами / С. В. Шевченко // Материали XXII міжнародної конф. «АВТОМАТИКА 2015» (10–11 вересня 2015 р., Одеса). – Одеса : ТЕС. – 2015. – С. 117–118.
5. Уздин Д. З. Новые меры близости, функции состояний и решающие правила в теории распознавания образов (состояний) / Д. З. Уздин. – М. : МАКС Пресс, 2015. – 95 с.
6. Шевченко С. В. Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы / С. В. Шевченко, А. А. Эгоянц // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 91–96.

References (transliterated)

1. Smart Grids European Technology Platform. Available at: <http://www.smartgrids.eu> (accessed 05 December 2016).
2. Kostrov D. Umnye seti jelektronsnabzhenija [smart grid] i problemy s kiberbezopasnost'ju [Smart grid and cybersecurity issues]. *Informacionnaja bezopasnost'*. 2014, no. 3, pp. 45–47.
3. Hurtado L. A., Nguyen P. H., Kling W. L. Smart grid and smart building inter-operation using agent-based particle swarm optimization. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2015, vol. 2, June, pp. 32–40.
4. Shevchenko S. V. Optimizacija upravlenija proizvodstvennymi sistemami [Optimization of production systems management]. *Materialy` XXII mizhnarodnoyi konf. "AVTOMATYKA 2015" (10-11 September 2015, Odessa)* [Materials of the XXII Int. Conf. "AUTOMATION 2015" (10-11 September 2015, Odessa)]. Odessa, TES Publ., 2015, pp. 117–118.
5. Uzdin D. Z. *Novye mery blizosti, funkcii sostojanij i reshajushhie pravila v teorii raspoznavanija obrazov (sostojanij)* [New measures closeness function of states and the decision rules in pattern recognition theory (states)]. Moscow, MAKS Press Publ, 2015. 95 p.
6. Shevchenko S. V., Jegojanc A. A. Formirovanie planov proizvodstva jelektroenergii s uchetom dinamiki izmenenija sostojanija jenergosistemy [Formation of electricity production plans, taking into account the dynamics of change in the power system status]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 58 (1167), pp. 91–96.

Поступила (received) 06.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Про формування складу задач інтелектуальних систем управління в електроенергетиці / С. В. Шевченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 41–45. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

О формировании состава задач интеллектуальных систем управления в электроэнергетике / С. В. Шевченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 41–45. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

About formation of the tasks composition of management for SMART GRID / S. V. Shevchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series : System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 41–45.– Bibliogr. : 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Сергій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: sv-shevchenko@ukr.net.

Шевченко Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: sv-hevchenko@ukr.net.

Shevchenko Serhii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Information Technology Management; tel. : (057) 707-64-74; e-mail: sv-shevchenko@ukr.net.

УДК 519.876.2:336

Т. В. НЕСКОРОДЕВА

МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ ОБОБЩЕННОГО ПОЛИАЛЬТЕРНАТИВНОГО ТРЕХМЕРНОГО ПРЯМОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКОГО УЧЕТА РАСХОДОВ КАК ОСНОВЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ АУДИТА

Визначено структурну модель узагальнених закономірностей даних синтетичного обліку витрат як основи автоматизації поліальтернативного аналізу на суперечливість за характеристиками різноманітності і масштабів діяльності підприємства, рівномірності і безперервності, граничних станів, здійснення однотипних операцій на верхньому рівні. Сформовані функціональні моделі узагальненого поліальтернативного прямого аналізу даних синтетичного обліку витрат за напрямками перетворень підлеглих передумовам бухгалтерського обліку «обачність», «повнота», «періодичність» як основи ІТ багаторівневої СППР аудиту з поліальтернативними критеріями оцінювання дотримання даних передумов.

Ключові слова: множина узагальнених закономірностей, множина альтернатив вибору множин що зіставляються, узагальнений поліальтернативний прямий аналіз, передумови бухгалтерського обліку, синтетичний облік, інформаційна технологія багаторівневої СППР аудиту, методика.

Определена структурная модель обобщенных закономерностей данных синтетического учета расходов как основа автоматизации полиальтернативного анализа на противоречивость по характеристикам разнообразия и масштабов деятельности предприятия, равномерности и непрерывности, предельных состояний, совершения однотипных операций на верхнем уровне. Сформированы функциональные модели обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненных предпосылкам бухгалтерского учета «осмотрительность», «полнота», «периодичность» как основы ИТ многоуровневой СППР аудита с полиальтернативными критериями оценивания соблюдения данных предпосылок.

Ключевые слова: множество обобщенных закономерностей, множество альтернатив выбора сопоставляемых множеств, обобщенный полиальтернативный прямой анализ, предпосылки бухгалтерского учета, синтетический учет, информационная технология многоуровневой СППР аудита, методика.

The structural model of generalized regularities of synthetic accounting cost data as the basis for the automation of polyalternative analysis of the contradictory characteristics a variety and scale of the enterprise, the uniformity and continuity, limit states, committing of the same operations on the upper level is defined. Formalized the set of alternatives to select subsets of the data with the direct analysis on the inconsistency of three prerequisites Provisions (standards) of accounting (P(s)A): "circumspection", "completeness", "periodicity". The structural model of a set of alternatives to select subsets and the generated functional model of the generalized polyalternative direct analysis of the data of synthetic accounting costs development subordinates according to the assumptions of the framework as it multi-level DSS audit polyalternative the criteria for evaluating compliance with preconditions P(s)A. The possibilities and benefits of applying the proposed methodology: polyalternative automation of data analysis on the inconsistency of the four kinds of characteristics of the enterprise; ability to identify various techniques of fraud through the implementation of polyalternative analysis of the patterns; opportunity to consider features of the operating activities of a company (different industry, technology, etc.) and system control on the types, phases and periods of work due to the possibility of a set of alternatives matched sets; to reduce the volume of analyzed data or the actual test at the lower levels due to separation of subsets with signs of fraud in the upper levels; to carry out a dialogue with decision makers in the language of the subject area through the formalization of directions of data transformations under the assumptions P(s)A.

Keywords: set of generalized regularities, many alternatives to select the compared sets, generalized polyalternative direct analysis, preconditions accounting, synthetic accounting, information technology, multi-level DSS audit technique.

Введение. В настоящее время актуальной научно-технической проблемой ИТ финансово-экономической сферы Украины является автоматизация выполнения функций и заданий обработки информации при аудите финансово-экономической деятельности предприятий [1, 2].

Существующие на сегодняшний день ИТ аудита позволяют автоматизировать только отдельные процедуры или провести аналитические процедуры в специальных случаях [3–6] и не позволяют учитывать особенности операционной деятельности предприятия (различные отрасли, технологии производства и т. д.) и системы контроля и проводить комплексный анализ для обоснования решений в многоуровневой системе аудита.

С целью создания и применения информационной технологии многоуровневой системы поддержки принятия решений в аудите на основании автоматизированного анализа данных в [7] определены структурные составляющие методологии обобщенного многомерного анализа данных синтетического учета по направлениям преобразований подчиненных предпо-

сылкам бухгалтерского учета Π_d , $d = \overline{1,4}$ (Π_1 – осмотрительность, Π_2 – полнота, Π_3 – периодичность, Π_4 – соответствие доходов и расходов) и их комбинациям D . Первая структурная составляющая методологии – методика обобщенного трехмерного анализа данных расходов (по направлениям преобразований подчиненным трем предпосылкам Π_d , $d = \overline{1,3}$ и их комбинациям $D_{1,2,3}$). Под обобщенным анализом понимается анализ свойств и структуры подмножеств расходов и их соответствия при преобразованиях по данным направлениям. В [8] определена методика формирования функциональной структуры преобразований данных расходов по данным направлениям и их комбинациям с целью подготовки данных к автоматизированному полиальтернативному трехмерному прямому анализу.

Цель статьи: разработать методику формализации обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных расходов как инструментария информационной технологии многоуровневой сис-

темы поддержки принятия решений в аудите с полиальтернативными критериями оценивания соблюдения предпосылок П(с)БУ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- формализовать структуру обобщенных закономерностей подмножеств расходов Q_p , которые характеризуют закономерности осуществления расходов предприятия;
- формализовать множества альтернатив сопоставляемых подмножеств при анализе данных расходов Q_p на противоречивость;
- определить схему обобщенного полиальтернативного одномерного прямого анализа данных расходов по направлениям преобразований подчиненным предпосылкам P_d , $d = \overline{1,3}$.

1. Структурная модель обобщенных закономерностей множеств данных синтетического учета расходов. Для автоматизации анализа закономерностей и определения структуры соответствующего раздела базы знаний ИТ выполним формализацию структуры обобщенных закономерностей подмножеств расходов Q_p , которые характеризуют закономерности осуществления расходов предприятия. Для этих целей определим структурную модель обобщенных закономерностей подмножеств расходов Q_p . Рассмотрим базу топологии расходов Q_p , которая согласно [8] имеет вид:

$$Q_p^\tau(T) = \left\{ N_p^i(t_m), P_p^i(t_m), E_p^i(t_m), Q_{on(i)}^p(t_m), Q_{s(i)}^p(t_m), i = \overline{1,4}, m = \overline{1,M} \right\}, \quad (1)$$

где T и t – периоды учета,

m и M – номер и количество периодов квантования периода учета соответственно,

i – вид расходов,

N_p, P_p, E_p – нормативные, плановые, отчетные множества данных расходов соответственно,

Q_{on}^p – множества данных операционной деятельности,

s – номер счета,

$s(1) = 20, s(2) = 23, s(3) = 26, s(4) = 63$,

$Q_{s(i)}^p$ – множества данных хозяйственных средств и источников.

Подмножества анализа образуют алгебру множеств $\mathfrak{R}(A)$ множеств базы топологии $A \in Q_p^\tau(T)$, [8]. На основании экономического содержания множеств A базы топологии расходов, определенной в (1) и теории множеств выделим следующие виды закономерностей, которые характеризуют закономерности деятельности предприятия и являются моделями:

1. Характеристик (мощность, размерность) множеств алгебры $\mathfrak{R}(A)$ ($A \in Q_p^\tau(T)$), которые характеризуют разнообразие и масштаб деятельности предприятия: количество операций, видов хозяйственных средств и источников, преобразование которых происходит в результате деятельности предприятия (количество видов запасов, поставщиков, покупателей и т. д.);
2. Свойств множеств анализа (замкнутость, открытость, предельные точки) множеств алгебры $\mathfrak{R}(A)$, которые характеризуют экономическую деятельность предприятия с точки зрения достижения предельных значений по различным параметрам или их комбинациям;
3. Структуры (плотность, изолированные, точки сгущения) множеств алгебры $\mathfrak{R}(A)$, которые характеризуют непрерывность и равномерность экономической деятельности предприятия, например по времени, или другим параметрам или их комбинациям;
4. Взаимосвязей элементов множеств алгебр $\mathfrak{R}(A)$, $A \in Q_p^\tau$, которые характеризуют закономерности осуществления однотипных (по одному или нескольким параметрам) операций за период t .

Каждый вид модели взаимосвязей порождает подмножество закономерностей $Z^v(t)$, $v = \overline{1,4}$, которые определяют структуру множества закономерностей каждого подмножества анализа:

$$Z_{A_{\mathfrak{R}}} = \bigcup_{v=1}^4 Z_{A_{\mathfrak{R}}}^v, \forall A_{\mathfrak{R}} \in \mathfrak{R}(A), A \in Q_p^\tau,$$

где v – вид закономерности,

Z_A – множество закономерностей множества A .

Согласно данной модели для каждого множества анализа существуют подмножества альтернативных закономерностей, которые описывают различные свойства осуществления расходов и определяют основу автоматизации полиальтернативного анализа.

Структуру множества закономерностей каждого множества базы топологии представим в виде подмножеств закономерностей по множествам алгебры $\mathfrak{R}(A)$:

$$Z_{A_{\mathfrak{R}}} = \bigcup_{A_{\mathfrak{R}} \in \mathfrak{R}(A)} Z_{A_{\mathfrak{R}}}^v.$$

Множество обобщенных закономерностей базы топологии расходов $Z_{Q_p^\tau}$ представим в виде объединения подмножеств закономерностей по множествам базы топологии расходов:

$$Z_{Q_p^\tau} = \bigcup_{A \in Q_p^\tau} Z_A.$$

Следовательно, множество закономерностей данных расходов имеет следующую структуру по видам закономерностей, множествам базы топологии и подмножествам анализа:

$$Z_{Q_p^p}^\tau = \bigcup_{v=1}^4 \bigcup_{A \in Q_p^p} \bigcup_{A_{\mathbb{R}} \in \mathbb{R}(A)} Z_{A_{\mathbb{R}}}^v. \quad (2)$$

Модель (2) определяет структуру раздела базы знаний по видам закономерностей, множествам базы топологии и подмножествам анализа. Для формализации последовательности анализа множества закономерностей (2) и их соответствия при анализе данных на противоречивость по направлениям преобразований подчиненным предпосылкам Π_d , $d = \overline{1,3}$ и их комбинациям $D_{1,2,3}$ необходимо сформировать функциональную модель обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных расходов по данным направлениям. Согласно функциональной структуре прямых преобразований данных расходов, разработанной в [8] рассмотрим формирование функциональной модели обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных расходов по каждой предпосылке. Анализ данных начнем с первой предпосылки, т. е. множество нормативных данных определяют множество начальных условий анализа на противоречивость, так как их достоверность можно установить по результатам документальной и фактической проверки.

2. Функциональная модель обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненным предпосылке «осмотрительность». Согласно функциональной структуре прямых преобразований данных расходов определенной в [8], прямой анализ данных по направлениям преобразований, подчиненных предпосылке Π_1 формализуем (рис. 1) в виде анализа обобщенных закономерностей множеств базы топологии (1) в соответствии со структурной моделью (2) по видам расходов («по горизонтали»).

Для выявления несоответствий при прямом анализе данных в последовательностях (3) определенных в [8], по каждому виду расходов могут сопоставляться свойства множеств нормативных данных N_p^i со свойствами множеств плановых, отчетных и т. д. с последующими множествами в последовательности преобразований (3):

$$N_p^i \xrightarrow{h_i} P_p^i \xrightarrow{\delta_i} E_p^i \xrightarrow{g_i} Q_{op(i)}^p \xrightarrow{z_i} Q_{s(i)}^p, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3)$$

где h, δ, g, f, z – прямые отображения.

Следовательно, множество альтернатив выбора подмножеств при прямом анализе на противоречивость по первой предпосылке по каждому виду операции расходов можно представить в виде множества

композиций прямых отображений $K(\Psi_1^i)$ по первой предпосылке для каждого вида расходов, которые имеет следующую структуру:

$$K(\Psi_1^i) = \{h_i, \delta_i, g_i, z_i, h_i \circ \delta_i, \delta_i \circ g_i, g_i \circ z_i, h_i \circ \delta_i \circ g_i, \delta_i \circ g_i \circ z_i, h_i \circ \delta_i \circ g_i \circ z_i\}, \quad i = \overline{1,4}, \quad (4)$$

где $N_p^i \xrightarrow{h_i \circ \delta_i} E_p^i, P_p^i \xrightarrow{\delta_i \circ g_i} Q_{op(i)}^p,$
 $E_p^i \xrightarrow{g_i \circ z_i} Q_{s(i)}^p, N_p^i \xrightarrow{h_i \circ \delta_i \circ g_i} Q_{op(i)}^p,$
 $P_p^i \xrightarrow{\delta_i \circ g_i \circ z_i} Q_{s(i)}^p, N_p^i \xrightarrow{h_i \circ \delta_i \circ g_i \circ z_i} Q_{s(i)}^p.$

Для автоматизации анализа закономерностей при прямых преобразованиях данных расходов по направлениям подчиненным предпосылке Π_1 и определения структуры раздела базы знаний ИТ по альтернативам сопоставляемых множеств, структуру множества композиций отображений (4) представим в виде объединения подмножеств композиций отображений каждого подмножества расходов в последующие в (3):

$$K(\Psi_1^i) = K_{N_p}(\Psi_1^i) \cup K_{P_p}(\Psi_1^i) \cup K_{Q_{op(i)}}(\Psi_1^i) \cup K_{Q_{s(i)}}(\Psi_1^i), \quad i = \overline{1,4}, \quad (5)$$

где $K_{N_p}(\Psi_1^i) = \{h_i, h_i \circ \delta_i, h_i \circ \delta_i \circ g_i, h_i \circ \delta_i \circ g_i \circ z_i\},$
 $K_{P_p}(\Psi_1^i) = \{\delta_i, \delta_i \circ g_i, \delta_i \circ g_i \circ z_i\},$
 $K_{E_p}(\Psi_1^i) = \{g_i, g_i \circ z_i\}, K_{Q_{op(i)}}(\Psi_1^i) = \{z_i\}.$

Для автоматизации анализа закономерностей и определения структуры раздела базы знаний ИТ по видам операций, множество композиций прямых отображений $K(\Psi_1^i)$ представим в виде объединения подмножеств композиций прямых отображений $K(\Psi_1^i)$ по видам расходов ($i = \overline{1,4}$):

$$K(\Psi_1) = \bigcup_{i=1}^4 K(\Psi_1^i), \quad (6)$$

где i – вид расходов,

$K(\Psi_1)$ – множество композиций прямых отображений по первой предпосылке Π_1 .

Согласно (5) множество закономерностей по каждому виду расходов $Z_{K(\Psi_1^i)}$ представим в виде объединения подмножеств закономерностей при композициях отображений каждого множества $K_{A_p^i}$

($A_p^i \in \{N_p^i, P_p^i, E_p^i, Q_{op(i)}^p, Q_{s(i)}^p\}$) определенных в (4):

$$Z_{K(\Psi_1^i)} = \bigcup_{A_p^i \in Q_p^p} Z_{K_{A_p^i}(\Psi_1^i)}, \quad (7)$$

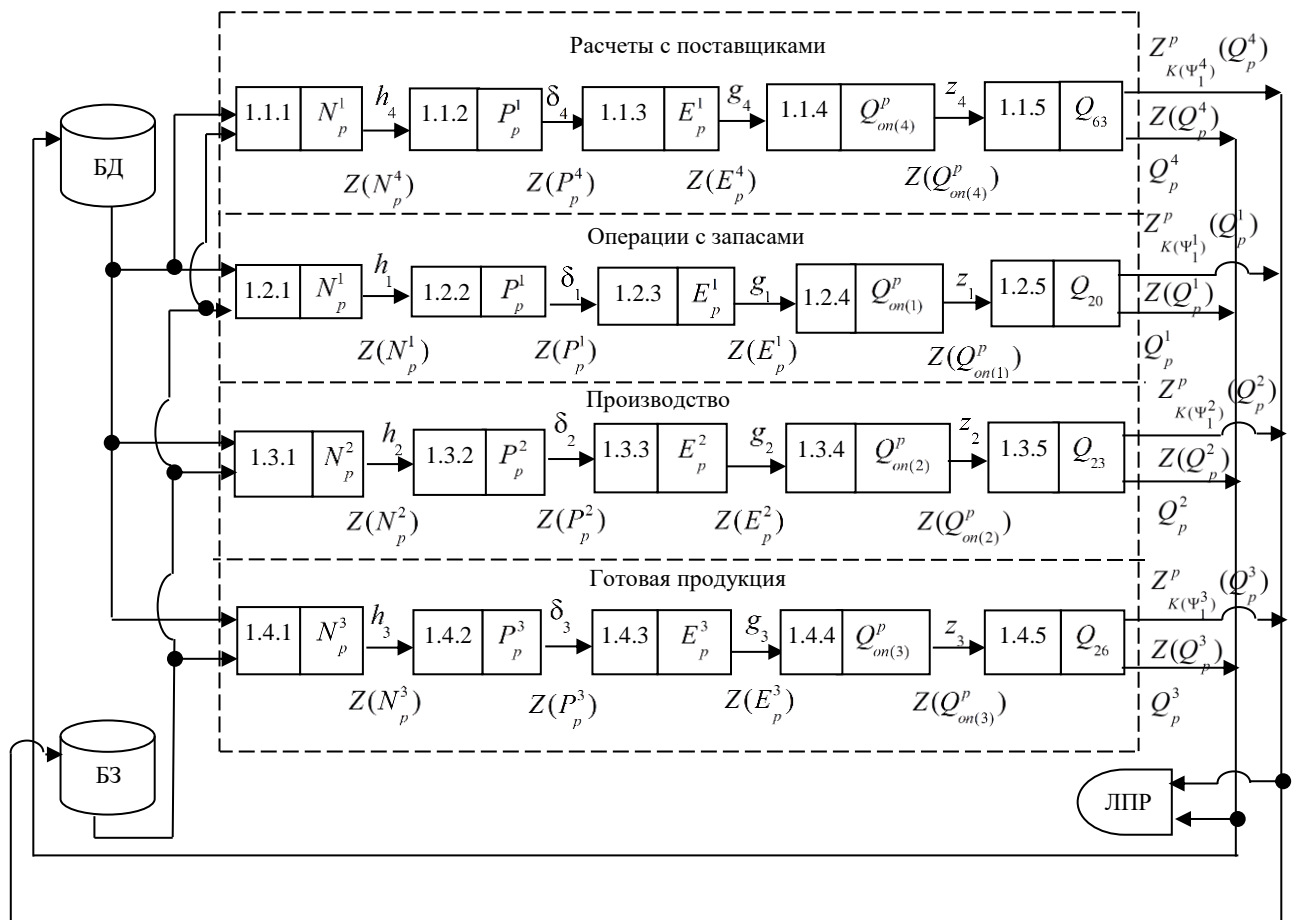


Рис. 1 – Блок-схема методики обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненных предпосылке осмотрительность (Π_1)

где $Z_{K_{A_p^i}(\Psi_1^i)}$ – множество закономерностей при композициях прямых отображений множества A_p^i , которое имеет следующую структуру:

$$Z_{K_{A_p^i}(\Psi_1^i)} = \bigcup_{A_{p, \text{Э}}^i \in \mathcal{R}(A_p^i)} Z_{K_{A_{p, \text{Э}}^i}(\Psi_1^i)}. \quad (8)$$

Согласно (6) множество закономерностей $Z_{K(\Psi_1)}$ при прямом анализе данных подчиненных первой предпосылке Π_1 представим в объединения подмножеств закономерностей $Z_{K(\Psi_1)}(A_p^i)$ по четырем видам работ:

$$Z_{K(\Psi_1)} = \bigcup_{i=1}^4 Z_{K(\Psi_1^i)}. \quad (9)$$

Модели (4)–(9) определяют структуру раздела базы знаний ИТ СППР аудита по первой предпосылке.

На рис. 1, как составная часть методологии обобщенного анализа, представлена развернутая структура обобщенного полиальтернативного прямого

анализа данных расходов (1) по направлениям преобразований, подчиненных предпосылке Π_1 .

Данная схема определяет последовательность формирования структуры данных расходов согласно модели (1) и накопления множеств закономерностей (7)–(9) на начальном этапе и их проверки на следующем этапе. Данные процедуры в каждом блоке осуществляются согласно структурной модели закономерностей (8), т. е. в каждом блоке формируется множество $A_p^i \in Q_p^p$ базы топологии расходов и подмножество закономерностей $Z_{K_{A_p^i}(\Psi_1^i)}$

по композициям его прямых отображений по направлениям преобразований подчиненным первой предпосылке.

На следующем этапе после проверки множества закономерностей (9) выделяется подмножество противоречивых закономерностей $Z_{K^\Phi(\Psi_1)}^\Phi \subseteq Z_{K(\Psi_1)}$, и соответствующее подмножество противоречивых пар множеств базы топологии расходов $Q_p^p(T) - K^\Phi(\Psi_1) \subseteq K(\Psi_1)$, которые поступают ЛПР, в соответ-

ствующий раздел БД, определяют множества анализа на среднем уровне и на нижнем уровне их подмножества анализируются в многоуровневой ИТ СППР аудита. Множества, которые по результатам анализа определены как противоречивые на нижнем уровне, подвергаются документальной или фактической проверке и в случае выявления фальсификаций корректируются. В результате, после анализа по первой предпосылке, в базу данных поступают скорректированные подмножества расходов, которые заменяют в базе топологии исходные сфальсифицированные. Для полученной базы топологии скорректированных расходов $\tilde{Q}_p^{\tau}(T)$ осуществляются процедуры прямого анализа данных по направлениям преобразований подчиненным второй предпосылке Π_2 , для которых необходимо формализовать схему обобщенного полиальтернативного прямого анализа.

3. Функциональная модель обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненным предпосылке «полнота». Согласно функциональной структуре прямых преобразований данных расходов определенной в [8], прямой анализ данных по направлениям преобразований, подчиненных предпосылке Π_2 формализуем (рис. 2) в виде анализа обобщенных закономерностей множеств базы топологии (1) в соответствии со структурной моделью (2) по этапам осуществления расходов («по вертикали»): нормирования, планирования, отчетности, учета результатов деятельности и хозяйственных средств и источников.

После анализа по первой предпосылке, в блоках сформированы подмножества анализа базы топологии скорректированных расходов $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^{\tau}$. Для выявления несоответствий при прямом анализе данных по второй предпосылке на этапе нормирования могут сопоставляться закономерности из множества (2) для нормативных данных по расчетам с поставщиками \tilde{N}_p^i с закономерностями множеств нормативных данных по движению запасов, производства и готовой продукции (блоки 1.1.1–1.4.1). Следовательно, множество альтернатив выбора подмножеств при прямом анализе на противоречивость по второй предпосылке на этапе нормирования можно представить в виде множества композиций прямых отображений $K(\Psi_2^{\eta})$ по второй предпосылке на этапе нормирования, которые имеет следующую структуру:

$$K(\Psi_2^{\eta}) = \{ \eta_4^1, \eta_1^2, \eta_2^3, \eta_4^1 \circ \eta_1^2, \eta_1^2 \circ \eta_2^3, \eta_4^1 \circ \eta_1^2 \circ \eta_2^3 \}, (10)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \tilde{N}_p^4 &\xrightarrow{\eta_4^1 \circ \eta_1^2} \tilde{N}_p^2, \\ \tilde{N}_p^1 &\xrightarrow{\eta_1^2 \circ \eta_2^3} \tilde{N}_p^3, \\ \tilde{N}_p^4 &\xrightarrow{\eta_4^1 \circ \eta_1^2 \circ \eta_2^3} \tilde{N}_p^3. \end{aligned}$$

Для автоматизации анализа закономерностей при прямых преобразованиях данных расходов по направлениям подчиненным предпосылке Π_2 и определения структуры раздела базы знаний ИТ по множествам альтернатив сопоставляемых множеств, структуру множества композиций отображений (10) представим в виде объединения подмножеств композиций отображений каждого подмножества в последующие (рис. 2):

$$K(\Psi_2^{\eta}) = K_{\tilde{N}_p^4}(\Psi_2^{\eta}) \cup K_{\tilde{N}_p^1}(\Psi_2^{\eta}) \cup K_{\tilde{N}_p^2}(\Psi_2^{\eta}), (11)$$

$$K_{\tilde{N}_p^4}(\Psi_2^{\eta}) = \{ \eta_4^1, \eta_4^1 \circ \eta_1^2, \eta_4^1 \circ \eta_1^2 \circ \eta_2^3 \},$$

$$K_{\tilde{N}_p^1}(\Psi_2^{\eta}) = \{ \eta_1^2, \eta_1^2 \circ \eta_2^3 \},$$

$$K_{\tilde{N}_p^2}(\Psi_2^{\eta}) = \{ \eta_2^3 \}.$$

Аналогичную структуру имеют множества композиций прямых отображений по второй предпосылке на этапах планирования, отчетности и учета результатов деятельности и хозяйственных средств, и источников:

$$K(\Psi_2^{\rho}) = \{ \rho_4^1, \rho_1^2, \rho_2^3, \rho_4^1 \circ \rho_1^2, \rho_1^2 \circ \rho_2^3, \rho_4^1 \circ \rho_1^2 \circ \rho_2^3 \},$$

$$K(\Psi_2^{\varepsilon}) = \{ \varepsilon_4^1, \varepsilon_1^2, \varepsilon_2^3, \varepsilon_4^1 \circ \varepsilon_1^2, \varepsilon_1^2 \circ \varepsilon_2^3, \varepsilon_4^1 \circ \varepsilon_1^2 \circ \varepsilon_2^3 \},$$

$$K(\Psi_2^q) = \{ q_{\text{onp}(4)}^{\text{onp}(1)}, q_{\text{onp}(1)}^{\text{onp}(2)}, q_{\text{onp}(2)}^{\text{onp}(3)}, q_{\text{onp}(4)}^{\text{onp}(1)} \circ q_{\text{onp}(1)}^{\text{onp}(2)},$$

$$q_{\text{onp}(1)}^{\text{onp}(2)} \circ q_{\text{onp}(2)}^{\text{onp}(3)}, q_{\text{onp}(4)}^{\text{onp}(1)} \circ q_{\text{onp}(1)}^{\text{onp}(2)} \circ q_{\text{onp}(2)}^{\text{onp}(3)} \},$$

$$K(\Psi_2^{\varphi}) = \{ \varphi_{63}^{20}, \varphi_{20}^{23}, \varphi_{23}^{26}, \varphi_{63}^{20} \circ \varphi_{20}^{23}, \varphi_{20}^{23} \circ \varphi_{23}^{26},$$

$$\varphi_{63}^{20} \circ \varphi_{20}^{23} \circ \varphi_{23}^{26} \},$$

$$K(\Psi_2^{\rho}) = K_{\tilde{P}_p^4}(\Psi_2^{\rho}) \cup K_{\tilde{P}_p^1}(\Psi_2^{\rho}) \cup K_{\tilde{P}_p^2}(\Psi_2^{\rho}), (12)$$

$$K(\Psi_2^{\varepsilon}) = K_{\tilde{E}_p^4}(\Psi_2^{\varepsilon}) \cup K_{\tilde{E}_p^1}(\Psi_2^{\varepsilon}) \cup K_{\tilde{E}_p^2}(\Psi_2^{\varepsilon}), (13)$$

$$K(\Psi_2^q) = K_{\tilde{Q}_{\text{on}(4)}^p}(\Psi_2^q) \cup K_{\tilde{Q}_{\text{on}(1)}^p}(\Psi_2^q) \cup K_{\tilde{Q}_{\text{on}(2)}^p}(\Psi_2^q), (14)$$

$$K(\Psi_2^{\varphi}) = K_{\tilde{\varphi}_{s(4)}^p}(\Psi_2^{\varphi}) \cup K_{\tilde{\varphi}_{s(1)}^p}(\Psi_2^{\varphi}) \cup K_{\tilde{\varphi}_{s(2)}^p}(\Psi_2^{\varphi}). (15)$$

Тогда множество композиций $K(\Psi_2)$, которые формализуют множества альтернатив выбора сопоставляемых подмножеств анализа по второй предпосылке Π_2 , можно представить в виде объединения подмножеств композиций прямых отображений по этапам деятельности предприятия:

$$K(\Psi_2) = K(\Psi_2^{\eta}) \cup K(\Psi_2^{\rho}) \cup K(\Psi_2^{\varepsilon}) \cup K(\Psi_2^q) \cup K(\Psi_2^{\varphi}). (16)$$

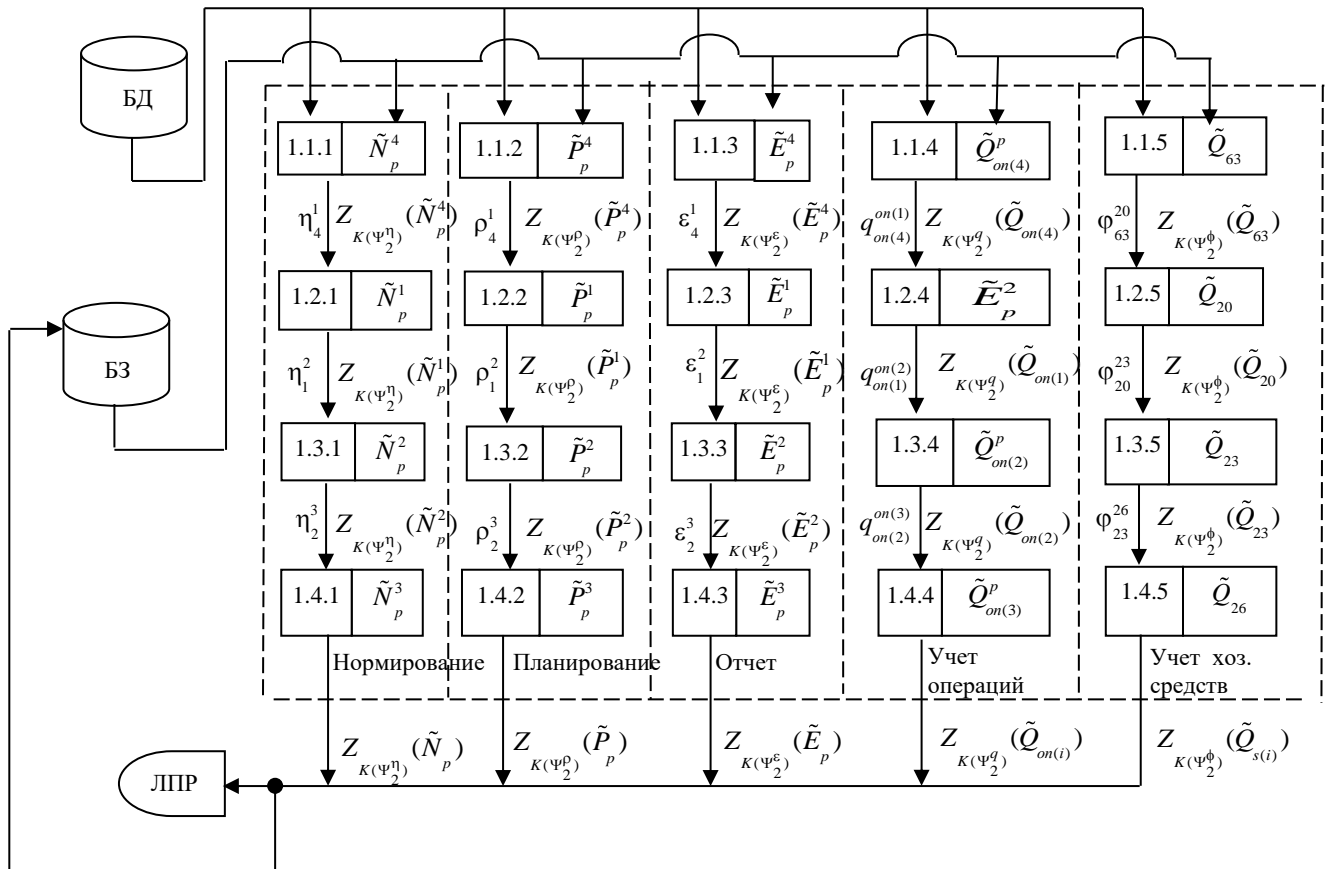


Рис. 2 – Блок-схема методики обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненных предпосылке «полнота» (P_2)

На основании (11) множество закономерностей Z_{η} при композициях отображений нормативных множеств $K(\Psi_2^{\eta})$ представим в виде объединения подмножеств закономерностей при композициях отображений каждого множества:

$$Z_{\eta} = Z_{K_{\tilde{N}_p^4}(\Psi_2^{\eta})} \cup Z_{K_{\tilde{P}_p^1}(\Psi_2^{\eta})} \cup Z_{K_{\tilde{N}_p^2}(\Psi_2^{\eta})}, \quad (17)$$

где $Z_{K_{\tilde{N}_p^i}(\Psi_2^{\eta})}$ – множество закономерностей при отображениях множества \tilde{N}_p^i .

Аналогичную структуру имеют множества закономерностей Z_{ρ} , Z_{ε} , Z_{η} и Z_{φ} при композициях отображений на этапах планирования, отчетности и учета результатов деятельности и хозяйственных средств и источников:

$$Z_{\rho} = Z_{K_{\tilde{P}_p^4}(\Psi_2^{\rho})} \cup Z_{K_{\tilde{P}_p^1}(\Psi_2^{\rho})} \cup Z_{K_{\tilde{P}_p^2}(\Psi_2^{\rho})}, \quad (18)$$

$$Z_{\varepsilon} = Z_{K_{\tilde{E}_p^4}(\Psi_2^{\varepsilon})} \cup Z_{K_{\tilde{E}_p^1}(\Psi_2^{\varepsilon})} \cup Z_{K_{\tilde{E}_p^2}(\Psi_2^{\varepsilon})}, \quad (19)$$

$$Z_{\eta} = Z_{K_{\tilde{Q}_{on(4)}^p}(\Psi_2^{\eta})} \cup Z_{K_{\tilde{Q}_{on(2)}^p}(\Psi_2^{\eta})} \cup Z_{K_{\tilde{Q}_{on(1)}^p}(\Psi_2^{\eta})}, \quad (20)$$

$$Z_{\varphi} = Z_{K_{\tilde{Q}_{s(4)}^p}(\Psi_2^{\varphi})} \cup Z_{K_{\tilde{Q}_{s(2)}^p}(\Psi_2^{\varphi})} \cup Z_{K_{\tilde{Q}_{s(1)}^p}(\Psi_2^{\varphi})}. \quad (21)$$

Для автоматизации анализа закономерностей и определения структуры раздела базы знаний ИТ по этапам работ множество закономерностей $Z_{K(\Psi_2)}$ при прямом анализе данных подчиненных второй предпосылке P_2 «полнота» представим в виде объединения подмножеств по этапам деятельности предприятия:

$$Z_{K(\Psi_2)} = Z_{\eta} \cup Z_{\rho} \cup Z_{\varepsilon} \cup Z_{\eta} \cup Z_{\varphi}. \quad (22)$$

На рис. 2, как составная часть методологии обобщенного анализа, представлена развернутая структура обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных расходов (1) по направлениям преобразований, подчиненных предпосылке P_2 . Данная схема определяет последовательность накопления закономерностей на начальном этапе и их проверки на следующем этапе. Данные процедуры в каждом блоке осуществляются согласно структурным моделям зако-

номерностей (17)–(21), т. е. в каждом блоке формируется подмножество закономерностей по композициям прямых отображений каждого множества базы топологии расходов $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau$ по направлениям преобразований подчиненным второй предпосылке. Модели (17)–(22) определяют структуру раздела базы знаний ИТ СППР аудита по второй предпосылке.

На следующем этапе после проверки множества закономерностей (22) выделяется подмножество противоречивых закономерностей $Z_{K(\Psi_2)}^\Phi \subset Z_{K(\Psi_2)}$, и соответствующее подмножество противоречивых пар множеств базы топологии расходов $\tilde{Q}_p^\tau - K^\Phi(\Psi_2) \subseteq K(\Psi_2)$, которые поступают ЛППР, в соответствующий раздел БД, определяют множества анализа на среднем уровне и на нижнем уровне их подмножества анализируются в многоуровневой ИТ СППР аудита. Множества, которые по результатам анализа определены как противоречивые на нижнем уровне, подвергаются документальной или фактической проверке и в случае выявления фальсификаций корректируются. В результате, после анализа по второй предпосылке, в базу данных поступают скорректированные подмножества расходов, которые заменяют в базе топологии исходные сфальсифицированные. Для полученной базы топологии скорректированных расходов $\tilde{Q}_p^\tau(T)$ осуществляются процедуры прямого анализа данных по направлениям преобразований подчиненным третьей предпосылке Π_3 , для которых необходимо формализовать схему обобщенного полиальтернативного прямого анализа.

4. Функциональная модель обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненным предпосылке «периодичность». Множество прямых отображений, которые формализуют преобразование данных по направлениям подчиненным третьей предпосылке «периодичность» Π_3 , представлено [8] в виде совокупности отображений между периодами квантования:

$$\Psi_3 = \{\theta_1^2, \dots, \theta_m^{m+1}, \dots, \theta_{M-1}^M\}. \quad (23)$$

Тогда множество композиций $K(\Psi_3)$, которые формализуют множества альтернатив выбора сопоставляемых подмножеств анализа по направлениям преобразований подчиненным третьей предпосылке Π_3 , представим в виде объединения подмножеств композиций за последовательные периоды $t_m, m = \overline{m_1, m_2}, (m_1 < m_2), m_1 = 1, M-1, m_2 = 2, M$ для каждого множества $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau$ базы топологии расходов:

$$K_{\tilde{A}_p^i}(\Psi_3) = \bigcup_{m_2=2}^M \bigcup_{m_1=1}^{M-1} K_{m_1}^{m_2}(\tilde{A}_p^i), \quad (24)$$

где $K_{m_1}^{m_2}(\tilde{A}_p^i) = \theta_{m_1}^{m_1+1}(\tilde{A}_p^i) \circ \dots \circ \theta_m^{m+1}(\tilde{A}_p^i) \circ \dots \circ \theta_{m_2-1}^{m_2}(\tilde{A}_p^i)$.

Для автоматизации анализа закономерностей при прямых преобразованиях данных расходов по направлениям подчиненным предпосылке Π_3 и определения структуры раздела базы знаний ИТ по множествам альтернатив сопоставляемых множеств, множество (24) представим в виде объединения подмножеств композиций отображений множества данных за период t_m в последующие периоды:

$$K_{\tilde{A}_p^i}(\Psi_3) = \bigcup_{m=1}^{M-1} K_{\tilde{A}_p^i(t_m)}(\Psi_3), \quad \forall \tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau, \quad (25)$$

где $K_{\tilde{A}_p^i(t_m)}(\Psi_3) = \bigcup_{m_2=m+1}^M K_{m_2}^{m_2}(\tilde{A}_p^i)$,

$$K_{m_2}^{m_2}(\tilde{A}_p^i) = \theta_m^{m+1}(\tilde{A}_p^i) \circ \dots \circ \theta_m^{m+1}(\tilde{A}_p^i) \circ \dots \circ \theta_{m_2-1}^{m_2}(\tilde{A}_p^i).$$

На основании (25) множество обобщенных закономерностей при прямых преобразованиях, по направлениям подчиненным третьей предпосылке Π_3 представим в виде объединения подмножеств закономерностей множеств базы топологии $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau$ по композициям множества $K_{\tilde{A}_p^i}(\Psi_3)$ определенного в (24):

$$Z_{K(\Psi_3)}(T) = \bigcup_{\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau} Z_{K_{\tilde{A}_p^i}(\Psi_3)}. \quad (26)$$

При этом множество закономерностей отображений каждого множеств базы топологии $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau$ согласно структуре композиций отображений (25) будет иметь следующую структуру:

$$Z_{K_{\tilde{A}_p^i}(\Psi_3)} = \bigcup_{m=1}^{M-1} Z_{K_{\tilde{A}_p^i(t_m)}(\Psi_3)}. \quad (27)$$

На рис. 3, как составная часть методологии обобщенного анализа, представлена развернутая структура обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных расходов (1) по направлениям преобразований, подчиненных предпосылке Π_3 .

Данная схема определяет последовательность накопления закономерностей на начальном этапе и их проверки на следующем этапе. Данные процедуры в каждом блоке осуществляются согласно структурным моделям множества закономерностей (26), (27), т. е. в каждом блоке формируется подмножество закономерностей по композициям прямых отображений каждого множества базы топологии расходов $\tilde{A}_p^i \in \tilde{Q}_p^\tau$ по направлениям преобразований подчиненным третьей предпосылке. Модели (23)–(27) определяют структуру раздела базы знаний ИТ СППР аудита по третьей предпосылке.

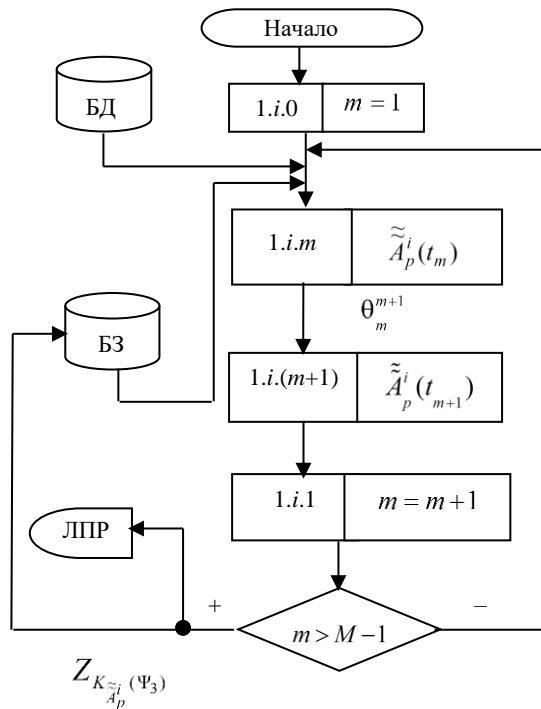


Рис. 3. Блок-схема методики обобщенного полиальтернативного прямого анализа данных синтетического учета расходов по направлениям преобразований подчиненным предпосылке периодичность

На следующем этапе после проверки множества закономерностей (26) выделяется подмножество противоречивых закономерностей $Z_{K(\Psi_3)}^\phi \subset Z_{K(\Psi_3)}$, соответствующее подмножество противоречивых пар множеств базы топологии расходов $\tilde{Q}_p^\tau(T) - K^\phi(\Psi_3) \subseteq K(\Psi_3)$, которые поступают ЛПР, в соответствующий раздел БД, определяют множества анализа на среднем уровне и на нижнем уровне их подмножества анализируются в многоуровневой ИТ СППР аудита. Множества, которые по результатам анализа определены как противоречивые на нижнем уровне, подвергаются документальной или фактической проверке и в случае выявления фальсификаций корректируются. В результате, после анализа по третьей предпосылке, в базу данных поступают скорректированные подмножества расходов, которые заменяют в базе топологии исходные сфальсифицированные. Для полученной базы топологии скорректированных расходов $\tilde{Q}_p^\tau(T)$ будут выполняться процедуры прямого анализа данных по направлениям преобразований подчиненным комбинациям трех предпосылок $D_{2,3}$ ($D_{2,3}$ – множество комбинаций предпосылок P_d , $d = \overline{1,3}$ по две и три), формализация которых планируется в следующих работах.

5. Возможности и преимущества применения методики формализации обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных

синтетического учета расходов как основы информационной технологии аудита. Преимущества предложенной методики формализации обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных расходов как инструментария информационной технологии многоуровневой системы поддержки принятия решений в аудите заключаются в следующем:

- возможности автоматизировать полиальтернативный анализ данных на противоречивость по характеристикам разнообразия и масштабов деятельности предприятия, равномерности и непрерывности, предельных состояний, совершения однотипных операций;
- возможности учитывать особенности операционной деятельности предприятия и системы контроля по видам, этапам и периодам работ за счет возможности набора альтернатив сопоставляемых множеств;
- уменьшить объем анализируемых данных или фактической проверки на нижних уровнях за счет выделения подмножеств с признаками фальсификаций на верхних уровнях;
- использовать результаты полиальтернативного анализа для подготовки принятия решений с полиальтернативными критериями оценивания соблюдения предпосылок П(с)БУ в ИТ многоуровневой СППР аудита.
- осуществлять диалог с ЛПР на языке предметной области за счет формализации направлений преобразований данных подчиненным предпосылкам П(с)БУ.

Выводы. Предложенная методика обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных синтетического учета расходов как основы ИТ многоуровневой СППР аудита с полиальтернативными критериями оценивания соблюдения предпосылок П(с)БУ, в отличие от существующих, имеет ряд преимуществ, указанных выше и является основанием для разработки методики обобщенного комбинированного трехмерного анализа по комбинациям трех предпосылок $D_{2,3}$ ($D_{2,3}$ – множество комбинаций предпосылок P_d , $d = \overline{1,3}$ по две и три).

Дальнейшие исследования предполагают разработку методики обобщенного комбинированного трехмерного анализа по комбинациям трех предпосылок $D_{2,3}$.

Список литературы

1. Xinli Hu. Effectiveness of information technology in reducing corruption in China / Xinli, Hu // Electronic Library, 2015. – Vol. 33. – Issue 1. – P. 52–64.
2. Ивахненко С. В. Информационные технологии аудита и внутрихозяйственного контроля в контексте мировой интеграции : монография / С. В. Ивахненко – Житомир : ЧП «Рута», 2010. – 432 с.
3. Андренко Е. А. Методика атрибутивного выборочного исследования в аудите / Е. А. Андренко, С. М. Мордовцев // Бизнес Информ, 2013. – № 2. – С. 200–203.
4. Jarrod West. Intelligent Financial Fraud Detection Practices: a comprehensive review / West Jarrod, M Bhattacharya and R Islam // Computers & Security, 2016. – Vol. 57. – P. 47–66.

5. Chi-Chen Lin. Detecting the financial statement fraud: The analysis of the differences between data mining techniques and experts' judgments / Lin Chi-Chen, Chiu An-An, Yan Huang Shao, C. Yen. David // Knowledge-Based Systems, 2015. – № 89. – P. 459–470.
6. Mohiuddin Ahmeda. A survey of anomaly detection techniques in financial domain / A Mohiuddin, N Mahmooda Abdun, Md Rafiqul Islam // Future Generation Computer Systems, 2016. – № 55. – P. 278–288.
7. Нескорородева Т. В. Структурные составляющие методологии создания и применения информационной технологии обобщенного многомерного анализа данных бухгалтерского учета [Электронный ресурс] / Т. В. Нескорородева // Матеріали XIII міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)", м. Вінниця, 3–6 жовтня 2016 р. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – Режим доступу : <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13184>
8. Т. В. Нескорородева. Методика формирования обобщенной функциональной структуры многомерных преобразований данных синтетического учета расходов предприятия в информационной технологии аудита / Т. В. Нескорородева // Радиоелектронні і комп'ютерні системи, 2016, № 3 (77) – С. 62–70.
3. Andrenko E. A. Mordovtsev S. M. Metodika atributivnogo vyborochnogo issledovaniya v audite [Methods of attributive sampling research in audit]. *Biznes Inform.* 2013, no. 2, pp. 200–203.
4. Jarrod West, Bhattacharya M., Islam R. Intelligent Financial Fraud Detection Practices: a comprehensive review. *Computers & Security.* 2016, vol. 57. pp. 47–66.
5. Chi-Chen Lin, Chiu An-An, Shao Yan Huang, David C. Yen. Detecting the financial statement fraud: The analysis of the differences between data mining techniques and experts' judgments. *Knowledge-Based Systems.* 2015, no. 89. pp. 459–470.
6. Mohiuddin Ahmeda. Mahmooda Abdun N, Rafiqul Islam Md. A survey of anomaly detection techniques in financial domain. *Future Generation Computer Systems.* 2016, no. 55, pp. 278–288.
7. Neskoroдеva T. V. Strukturnye sostavljajushhie metodologii sozdaniya i primeneniya informacionnoj tehnologii obobshhennogo mnogomernogo analiza dannyh buhgalterskogo ucheta [Structural components of methodology of creation and application information technology of a generalized multivariate analysis of accounting data] *Materialy XIII mizhnarodnoyi konferenciyi "Kontrol' i upravlinnya v skladny'x sy'stemax (KUSS-2016)", m. Vinny'cya, 3–6 zhovtnya 2016 r.* – Vinny'cya : VNTU Publ., 2016. – Available at: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13184>
8. Neskoroдеva T. V. Metodika formirovaniya obobshhennoj funkcional'noj struktury mnogomernykh preobrazovanij dannykh sinteticheskogo ucheta rashodov predpriyatija v informacionnoj tehnologii audita [Method of forming generalized functional structure of the multidimensional transformation of synthetic accounting data of enterprise costs in information technology of audit]. *Radioelektronni i komp'yuterni sy'stemy.* 2016, no. 3 (77), pp. 62–70.

References (transliterated)

1. Xinli Hu. Effectiveness of information technology in reducing corruption in Chin. *Electronic Library.* 2015, vol. 33, issue 1, pp. 52–64.
2. Ivakhnenkov S. V. *Informatsionnye tekhnologii audita i vnutrikhozyaystvennogo kontrolya v kontekste mirovoy integratsii : monografiya* [Information technology of the audit and internal control in the context of world integration : monograph]. Zhitomir. ChP "Ruta" Publ., 2010. 432 p.

Поступила (received) 05.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика формалізації узагальненого поліальтернативного тривимірного прямого аналізу даних синтетичного обліку витрат як основи інформаційної технології аудиту / Т. В. Нескорородева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 46–54. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Методика формализации обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных синтетического учета расходов как основы информационной технологии аудита / Т. В. Нескорородева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 46–54. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

The technique of formalization of the generalized three-dimensional polyalternative direct analysis of the data of synthetic accounting costs as the basis for information technology audit / T. V. Neskoroдеva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – № 45 (1217). – С. 46–54. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нескорородева Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, доцент кафедри математики і математичних методів в економіці; тел.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

Нескорородева Татяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Донецкий национальный университет имени Василия Стуса, Винница, доцент кафедры математики и математических методов в экономике; тел.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

Neskorodieva Tatiana Vasilevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Donetsk national University named Vasyl Stus, Associate Professor at the Department of mathematics and mathematical methods in Economics; tel.: (050) 137-75-20; e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua.

УДК 004.41

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, І. В. ЛЮТЕНКО, С. О. ЛІЛКОВИЧ

ПІДХІД ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ СУБ'ЄКТНОЇ ДИВЕРСНОСТІ В УМОВАХ БАГАТОВЕРСІЙНОЇ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розглядається можливість забезпечення диверсифікації програмних проектів за рахунок підвищення рівня суб'єктної диверсності. Висунута гіпотеза про можливість оцінки різноманітності розробників через набір оцінок, що відбивають підхід кандидата до розробки, тип його особистості. Запропоновано підхід для обчислення рівня суб'єктної диверсності, формалізовано вимоги до програмного забезпечення запропонованого підходу, розглянуто існуючі програмні рішення.

Ключові слова: диверсність, багатoversійна розробка, оцінки, якість програмного забезпечення, метод, вимоги.

Рассматривается возможность обеспечения диверсификации программных проектов за счёт повышения уровня субъектной диверсности. Выдвинута гипотеза о возможности оценки разнообразия разработчиков через набор оценок, отражающих подход кандидата к разработке, тип его личности. Предложен подход для вычисления уровня субъектной диверсности, формализованы требования к программному обеспечению предложенного подхода, рассмотрены существующие программные решения.

Ключевые слова: диверсность, многоверсионная разработка, оценки, качество программного обеспечения, метод, требования.

The possibility of diversifying software projects by improving the level of subject diversity is reviewed. Improvement of subject diversity level leads to software quality improvement, so a hypothesis on the possibility of assessing the diversity of developers through a set of assessments was made. The assessment set includes candidate's attitude to the software development process and candidate's individual type. Thus, the assessment set does not contain project-specific parameters, so subject diversity evaluation is project independent too. Approach for calculating the level of subject diversity was offered as well as toolkit software requirements were formalized. After all, review of existing software was made.

Keywords: diversely, multi-version development, evaluation, software quality, method, requirements.

Вступ. Розробка програмного забезпечення пов'язана з проблемами якості, вартості та надійності. Деякі програми містять мільйони рядків вихідного коду, які, як очікується, повинні правильно виконуватися в умовах, що змінюються.

Одним з найскладніших процесів при розробці ПЗ є пошук і виправлення помилок, що впливають на надійність та якість програмного продукту. Навіть якщо архітектура продукту в цілому вибрана правильно, більш локальні помилки наявні завжди: друкарські помилки, завжди помилкові або істинні умови, використання змінної до ініціалізації або інші помилки що призводять до невизначеної поведінки, тощо.

Наприклад, статичний аналізатор вихідного коду «PVS-Studio» знайшов безліч помилок в Open-Source проектах, в тому числі в Chromium, QT, Clang, Apache, MySQL, FAR Manager, Audacity. В цілому команда розробників «PVS-Studio» проаналізувала 224 популярних програмних продукти, які використовуються по всьому світу, та знайшла 9055 помилок. В середньому це складає більш ніж 40 помилок на кожний проект [1].

Разом з тим, деякий клас помилок дуже складно знайти, як за допомогою будь-якого з існуючих інструментів, так і вручну. Ці помилки можуть і призводять до зниження якості програмних продуктів. В якості прикладу такої вразливості можна навести «Heartbleed» – вразливість, що була присутня в широко використовуваній та відкритій бібліотеці OpenSSL. Уразливість проявлялася при обробці так званих heartbeat запитів від клієнтів. Ці запити використовуються для підтримки захищеного з'єднання в той час як воно не використовується, тобто клієнт та сервер час від часу обмінюються heartbeat пакетами.

Кожний з heartbeat пакетів транспортує корисні дані заявленого розміру, отже після отримання heartbeat пакету сервер виділяє стільки пам'яті під корисні дані, скільки було заявлено клієнтом. Занулення виділеної з кучі пам'яті не виконується, тому якщо сервер OpenSSL виділить пам'яті більше ніж фактично було отримано даних в heartbeat пакеті, то в цей буфер попадуть попередні значення що знаходились в кучі. Так як OpenSSL самостійно виконує керування кучею, то в буфер гарантовано попадають дані, пов'язані саме з роботою захищених протоколів передачі даних.

Після формування дефектного буферу сервер OpenSSL формує heartbeat-відповідь, де в якості тіла пакету використовуються дані з цього вищезазначеного буферу. Таким чином зловмисник, сформувавши описаним чином мережевий пакет heartbeat міг отримати частину даних з кучі OpenSSL. Незважаючи на те що вразливість здається занадто обмеженою, адже подібним чином не можна вилучити значну кількість даних, зловмисникам успішно вдавалося діставати конфіденційні дані.

Таким чином, вразливість «Heartbleed» являється наслідком відсутності перевірки границь масиву [2].

Одним з підходів до зниження кількості помилок є використання принципу диверсифікації, який полягає в розробці та інтеграції одразу декількох версій програмного продукту, або його частин [3]. Як правило за принципом диверсифікації розроблюються критичні, гарантоздатні програмні продукти [4].

Забезпечення багатoversійності полягає в забезпеченні різноманітності виконавців, мов та нотацій, інструментів розробки.

Ціллю статті є висвітлення питання підвищення якості багатoversійного програмного забезпечення через підвищення рівня саме суб'єктної диверсності.

Роль суб'єктної диверсифікації в сучасній розробці. Диверсність що забезпечується різноманіттям розробників прийнято називати суб'єктною диверсністю [3].

Для оцінки рівня диверсифікації програмної системи існують формалізовані підходи, які дозволяють оцінити різноманітність програмних платформ.

Використання формальних метрик програмного коду дозволяють чисельно оцінити різноманітність програмних реалізацій [5], а в разі використання ПЛІС подібна методика може бути поширена на код, який визначає принципову електричну схему апаратної платформи [4].

Зазначені підходи добре відомі та дозволяють довести наявність різноманітності апаратних і програмних платформ на етапі розробки та здачі проекту.

У той же час вимірюванню рівню різноманітності розробників приділяється менше уваги, що пов'язано з відсутністю математично доведеної залежності між складом команди розробників та рівнем диверсифікації продукту. Розробка такого апарату може дозволити оцінити рівень різноманітності розробників, що впливає на рівень диверсифікації проекту в цілому, можливо ще до початку розробки.

Огляд запропонованого підходу. В ході роботи авторами висунута гіпотеза про те, що різноманітність розробників можна оцінити через:

1. Формальні метрики вихідного коду (S). На етапі підготовки команди кандидати отримують однакові тестові завдання, які необхідно реалізувати з однаковим набором інструментів. Якщо завдання досить тривіальне, то можна вважати, що будь-які відмінності в реалізації досягаються за рахунок відмінностей між виконавцями. Важливо зазначити, що якість програмного коду з цієї точки зору не має значення, адже розглядаються саме відмінності з точки зору реалізації завдання, тому для аналізу програмного коду можна використовувати метрики, які спеціально орієнтовані на виявлення відмінностей, що вносяться кандидатом та складають його персональний відбиток на реалізації типового завдання [6].
2. Професійні оцінки (P). Різноманітність розробників можна оцінити за допомогою декількох запитань, які допоможуть оцінити ставлення кандидата до роботи. При цьому такий підхід не слід розцінювати як свідомий вибір парадигми розробки: він виражається, наприклад, тільки в тому як програміст використовує наявну кодову базу, або в тому, на які міркування спирається архітектор при проектуванні системи. Отримати подібні оцінки можна не тільки за допомогою опитування, а і за допомогою аналізу дій які виконує програміст в ході виконання роботи, при чому цей аналіз може бути автоматизований.

3. Тип особистості (C). Особливості особистості можуть впливати на розробку невизначеним чином. Беручи до уваги ряд показників, що вказують на той чи певний тип особистості, можна спробувати врахувати цей вплив. Для визначення цих оцінок зручно використовувати існуючі визнані методики, наприклад MBTI [7].

При використанні запитань з варіантами відповіді «так» і «ні» оцінки P легко можуть бути представлені у вигляді бінарної множини. Відмінності між двома множинами P_A і P_B , які утворені кандидатами A і B відповідно, можуть бути оцінені за допомогою оператора d :

$$d_w(P_A, P_B) = \{x | x = k_i \forall P_{A_i} \neq P_{B_i}\}.$$

Тут k_i – це ваговий коефіцієнт, який визначає важливість i -ї відмінності у відповідях кандидатів.

Оцінки S і C залежать від використовуваної методики, але як правило носять абсолютний характер і можуть бути підсумовані з оцінками P для знаходження узагальненого рівня різноманітності розробників C_1 і C_m – значення $V(C_1, C_m)$:

$$V(C_1, C_m) = K_1 \sum_{i=0}^j [w_i |s_i^{C_1} - s_i^{C_m}|] + K_2 d_w(C^{C_1}, C^{C_m}) + K_3 d_w(P^{C_1}, P^{C_m}).$$

Тут w_i являє ваговий коефіцієнт i -ї формальної метрики програмного коду.

Програмне забезпечення. Для перевірки висунутої гіпотези необхідно провести опитування та ранжування респондентів згідно до наведених критеріїв. До інструменту проведення опитування висуваються наступні вимоги:

1. Можливість проводити ряд опитувань послідовно;
2. Автоматичне підбиття результатів там де це можливо, наприклад автоматичне юніт-тестування програмного коду, аналіз програмного коду на основі набору формальних метрик, розрахунок показників за методиками аналізу особистості. Оператор системи повинен мати можливість протестувати декілька наборів метрик для виявлення найбільш ефективних з них;
3. Збереження результатів, API доступу до збережених показників та проміжних результатів.

Автори розглядали наступні популярні продукти як такі що можуть бути використані в якості засобу для проведення необхідного опитування:

1. Google Forms;
2. Survey Monkey;
3. Survey Gizmo;
4. SurveyPlanet.

Порівняння певних, важливих в даному випадку, властивостей цих продуктів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння програмних продуктів що можуть бути використані для проведення опитування

Назва	Критерії			
	Можливість об'єднати декілька опитувань	API для автоматизації розрахунків	API доступу до даних	Ціна
Google Forms	Так	Є	Є	Безкоштовно
Survey Gizmo	Так	Немає	Вивантаження результатів в файл CSV	300€ на рік за користувача
Survey Monkey	Так	SPSS	Вивантаження результатів в файл CSV	\$75 на рік
SurveyPlanet	Так, підтримується розгалуження	Немає	Вивантаження результатів в файл CSV, JSON, Word, Excel	\$20 на місяць

Очевидно що більшість наведених програмних продуктів не відповідають висунутим функціональним вимогам. Google Forms може бути використаний, проте реалізація специфічних функцій, таких як автоматичне тестування та аналіз програмного коду що надають респонденти, уявляється складною, такою що знаходиться за рамками передбачених можливостей Google Forms, задачею. Тому авторами було прийняте рішення про розробку програмного забезпечення для перевірки висунутої гіпотези дослідження.

Авторами розроблений програмний продукт який орієнтований на збір статистичної інформації для перевірки висунутої гіпотези. Згідно з задекларованими вище критеріями S, P, C цей програмний продукт збирає відповіді користувачів для подальшого аналізу. Взяти участь в опитуванні можна мережею інтернет за адресою <http://cw51.lilikovych.name/aprly>.

Подальші роботи. Пропонується використовувати даний підхід для формування складу команд розробників гарантоздатного програмного забезпечення. Для цього необхідно:

1. Обрати конкретні метрики програмного коду. Наразі пропонується близько 50 різних метрик [8] таких що можуть бути використані для оцінки рівня диверсифікації. Необхідно оцінити їх ефективність та автоматизувати їх обчислення;
2. Обрати методіку визначення типу особистості або інших персональних властивостей кандидата (критерії P, C). Пропонується використовувати МВТІ та спеціально розроблені запитання;
4. Оцінити кореляцію між критеріями S, P, C для використання інших оцінок, крім формальних метрик вихідного коду;
5. Налаштувати вагові коефіцієнти w, k, K або розробити множину коефіцієнтів для різних типів проектів;
6. Обрати алгоритм ранжування розробників за отриманими оцінками для подальшого формування груп.

Висновки. Очевидно, що запропонований метод оцінки потребує розробки або адаптації існуючих вищезазначених методів, таких як МВТІ. В даний час відповідні формальні метрики програмного коду не можуть гарантувати точне визначення авторського підходу, однак навіть на нетривіальних завданнях показують успішні результати точність яких досягає 63% [6, 8].

Вибір конкретних методів визначення як типу особистості кандидата, так і вибір набору формальних метрик програмного коду залишається за рамками даної публікації, адже конкретні висновки про ефективність можна робити лише після апробації цих алгоритмів.

Як і в багатьох інших підходах цього класу, заснованих на використанні галузевого досвіду, для забезпечення правильних результатів необхідно буде налаштувати коефіцієнти w, k, K . Разом із тим описаний підхід не потребує попереднього навчання та може застосовуватися ще до початку розробки проекту для якого забезпечується необхідний рівень суб'єктивної диверсності.

Список літератури

1. An always up-to-date list of articles describing errors that we find in open source projects with PVS-Studio analyzer / . // PVS-Studio – Режим доступу: <http://www.viva64.com/en/inspections>. – Дата звертання: 18 листопада 2016.
2. Z. Durumeric. The matter of heartbleed / Z. Durumeric, J. Kasten, D. Adrian [et al.] // Conference on Internet Measurement Conference. – 2014. – С. 475–488.
3. Sommerville I. Software engineering / I. Sommerville. – Pearson Education, 2007. – 792 с.
4. Скляр В. В. Метрики оценок сложности проектов ПЛИС, реализующих алгоритмы управления технологическим оборудованием АЭС / В. В. Скляр, В. А. Головин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 2007. – С. 82–86.
5. Харченко В. С. Использование метрик Холстеда при оценке безопасности критического программного обеспечения / В. Харченко, В. Скляр, А. Гордеев [та ін.] // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – № 4. – С. 145–150.
6. Маевский Д. А. Определение авторства программного обеспечения по исходному коду программ / Д. Маевский, Ю. Чербаджи. // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 6. – С. 64–68.

7. *Hilsenroth M. J.* Comprehensive handbook of psychological assessment / *M. J. Hilsenroth, D. L. Segal, M. Hersen.* – Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2004. – 688 с.
 8. *Ding H.* Extraction of Java program fingerprints for software authorship identification / *H. Ding, M. H. Samadzadeh.* // *Journal of Systems and Software.* – 2004. – № 72. – С. 49–57.
 5. *Kharchenko, V.S., Sklyar, V.V., Gordeev, A.A., Tokarev, V.I., Gerasimenko, A.D., Belyy, Yu.A.* Ispol'zovanie metrik Kholsteda pri otsenke bezopasnosti kriticheskogo programmogo obespecheniya [Halstead metrics usage for assessing the safety of critical software]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy.* 2003, no. 4, pp. 145–150.
 6. *Maevskiy, D., Cherbazhi, Yu.* Opredelenie avtorstva programmogo obespecheniya po iskhodnomu kodu programm [Defining software authorship on the source code of programs]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy.* 2014, no. 6, pp. 64–68.
 7. *Hilsenroth M.* *Comprehensive handbook of psychological assessment.* N. J, Hoboken, John Wiley & Sons Publ., 2004. 688 p.
 8. *Ding, H., Samadzadeh, M.H.* Extraction of Java program fingerprints for software authorship identification. *Journal of Systems and Software.* 2004, vol. 72, no. 1, pp. 49–57. doi: 10.1016/S0164-1212(03)00049-9
- Надійшла (received) 28.11.2016

References (transliterated)

1. An always up-to-date list of articles describing errors that we find in open source projects with PVS-Studio analyzer [WWW Document]. Available at: <http://www.viva64.com/en/inspections/> (accessed 18.11.2016)
2. *Durumeric, Z., Kasten, J., Adrian, D., Halderman, J.A., Bailey, M., Li, F., Weaver, N., Amann, J., Beekman, J., Payer, M.* [The matter of heartbleed]. *Internet Measurement Conference.* ACM, 2014, pp. 475–488. doi: 10.1145/2663716.2663755
3. *Ian Sommerville.* *Software Engineering.* Pearson Education Publ., 2007. 792p.
4. *Sklyar, V.V., Holovyv, V.A.* Metriki otsenki slozhnosti proektov PLIS, realizuyushchikh algoritmy upravleniya tekhnologicheskimi oborudovaniem AES [Complexity estimation metrics for FPGA

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підхід та засоби вимірювання суб'єктної диверсності в умовах багатoversійної розробки програмного забезпечення / Д. Л. Орловський, І. В. Лютенко, С. О. Лілікович // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 37 (1209). – С. 55–58. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Поход и средства измерения субъектной диверсности в условиях многоверсионной разработки программного обеспечения / Д. Л. Орловский, И. В. Лютенко, С. А. Лиликович // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 37 (1209). – С. 55–58. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.

Approach and tools for measurement of subject diversity in context of multi-version software development / D. L. Orlovskiy, I. V. Lutenko, S. O. Lilikovych // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 37 (1209). – P. 55–58. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Орловський Дмитро Леонідович – доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: 70-76-474; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Орловский Дмитрий Леонидович – доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: 70-76-474; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Orlovskiy Dmytro Leonidovych – assistant professor at the department of computer science and software engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: 70-76-474; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Лютенко Ірина Вікторівна – старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (068) 342-24-48; e-mail: liv@kpi.kharkov.ua.

Лютенко Ирина Викторовна – старший преподаватель кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (068) 342-24-48; e-mail: liv@kpi.kharkov.ua.

Liutenko Iryna Viktorivna – senior lecturer at the department of computer science and software engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (068) 342-24-48; e-mail: liv@kpi.kharkov.ua.

Лілікович Сергій Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (067) 317-29-68; e-mail: sergiy.lilikovych@gmail.com.

Лиликович Сергей Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (067) 317-29-68; e-mail: sergiy.lilikovych@gmail.com.

Lilikovych Serhii Oleksandrovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (067) 317-29-68; e-mail: sergiy.lilikovych@gmail.com.

УДК 519.681

В. В. КАРПЕНКО

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Сформульовано задачу забезпечення доставки товару від виробника до випадкової множини споживачів. Розглянуто методи знаходження найкоротших маршрутів. Встановлено, що для задач реальної розмірності ці методи не забезпечують можливості отримання швидкого рішення. Запропоновано метод знаходження найкоротшого маршруту, заснований на використанні спеціальної операції над числовими матрицями, елементи яких складаються з довжин шляхів між сусідніми пунктами на маршруті. Метод дозволяє отримати швидко наближене рішення задачі, близьке до оптимального.

Ключові слова: задача маршрутизації, управління перевезеннями, транспортна задача, лінійне програмування, пошук найкоротшого маршруту, задача комівояжера, знаходження маршруту у реальному часі, ефективність маршрутизації.

Сформулирована задача обеспечения доставки продукта от производителя к случайному множеству потребителей. Рассмотрены методы отыскания кратчайших маршрутов. Установлено, что для задачи реальной размерности эти методы не обеспечивают возможности получения быстрого решения. Предложен метод отыскания кратчайшего маршрута, основанный на использовании специальной операции над числовыми матрицами, элементы которых – длины путей между соседними пунктами на маршруте. Метод позволяет получить быстро приближенное решение задачи, близкое к оптимальному.

Ключевые слова: задача маршрутизации, управление перевозками, транспортная задача, линейное программирование, отыскание кратчайшего маршрута, задача коммивояжера, нахождение маршрута в реальном времени, эффективность маршрутизации.

The problem of ensuring the delivery of the product from the producer to the random set of consumers. An important characteristic of the possible technologies to solve this problem is lead time, which depends on the length of the route from producer to consumer. The known methods for finding the shortest routes based on real city roads. It was found that these methods do not provide opportunities for a quick solution to the real dimension of the problem. A method for finding the shortest route based on the use of special operations on numerical matrices whose elements – the path lengths between adjacent points on the route. The method provides a quick approximate solution is close to optimal. An example explaining the essence and meaning of the proposed computational procedure for solving the problem.

Keywords: routing problem, transportation management, transportation problem, linear programming, finding the shortest route, the traveling salesman problem, finding a route in real-time routing efficiency.

Введение. В современных условиях хозяйствования важное значение приобретает задача управления перевозками. Для крупных фирм, располагающих разветвленной сетью филиалов, складов, с многоэлементной системой потребителей появляется потребность в решении транспортной задачи (по схеме «от многих к многим»). Аналогичная задача возникает и при управлении транспортировками для производственных предприятий, имеющих многономенклатурную, территориально распределенную систему разнотипных подразделений, обеспечивающих реализацию технологического процесса производства. Не менее важной для практики является задача управления перевозками в системе «от одного к многим».

Анализ основных достижений и литературы. Следует отметить важную особенность реальных задач управления перевозками от классических транспортных задач [1, 2]. Постановка традиционных транспортных задач предусматривает отыскание распределения объема перевозок от совокупности поставщиков к совокупности потребителей. При этом совершенно не рассматривается вопрос о том, по какому маршруту должен транспортироваться груз от конкретного поставщика к конкретному потребителю. Вместе с тем, во многих случаях эта проблема выходит на первый план. Именно так дело обстоит в задаче доставки какого-либо продукта массового потребления от пункта производства этого продукта к множеству его заказчиков. При этом, ввиду территориального рассредоточения множества независимых потребителей возникает необходимость решения соответствующего множества разных задач маршрутизации. Каждая конкретная задача этого типа

формулируется следующим образом. Заданы пункт производства и пункт потребления, а также совокупность промежуточных пунктов, через которые может проходить маршрут от начального пункта к конечному. Кроме того, если из промежуточного пункта i возможен непосредственный переезд в промежуточный пункт j , то задано расстояние между ними r_{ij} , необязательно равное r_{ji} , $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, N$. Далее вводится набор индикаторов

$$x_{i_1 i_2} = \begin{cases} 1, & \text{если маршрут между начальным} \\ & \text{и конечным пунктами содержит} \\ & \text{участок между пунктами } i_1, i_2, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Этот набор образует матрицу $X = (x_{i_1 i_2})$.

Тогда общая длина маршрута будет равна

$$L(X) = \sum_{i_1=1}^N \sum_{i_2=1}^N r_{i_1 i_2} x_{i_1 i_2}. \quad (1)$$

Задача состоит в отыскании набора, минимизирующего целевую функцию (1). Этот набор должен удовлетворять следующей системе ограничений

$$\sum_{i_2=1}^N x_{i_1 i_2} \leq 1, \quad i_1 = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

$$\sum_{i_1=1}^N x_{i_1 i_2} \leq 1, \quad i_2 = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

$$u_{i_1} - u_{i_2} + nx_{i_1 i_2} \leq n - 1, \quad (4)$$

$$i_1 = 1, 2, \dots, N, \quad i_2 = 1, 2, \dots, N.$$

Система ограничений (2) обеспечивает построение маршрута, в котором выезд из каждого пункта i_1 осуществляется не более чем один раз. Ограничения (3) обеспечивают въезд в каждый из пунктов не более одного раза. Наконец, система ограничений (4) устраняет возможность появления циклов и построение связанного маршрута.

Эта задача напоминает задачу коммивояжера [3, 4]. Принципиальное отличие состоит в том, что в данной задаче искомый маршрут может, но не обязательно должен проходить через все промежуточные пункты N . Полученная задача относится к классу целочисленных задач линейного программирования с булевыми переменными.

Известные методы решения булевых задач линейного программирования. В теории линейного программирования разработаны общие методы решения целочисленных задач – методы отсечения и эффективного перебора [5–7].

Методы отсечения основаны на возможности построения в пространстве переменных гиперплоскости, которая отсекает нецелочисленные решения задачи от целочисленных [5]. При этом происходит добавление к системе ограничений задачи дополнительного ограничения. Новая задача решается без учета ограничения на целочисленность. Если полученное решение оказывается нецелочисленным, то строится новая отсекающая гиперплоскость. Процесс продолжается до получения целочисленного решения. Основным недостатком метода – непрогнозируемая продолжительность времени решения задачи, которая может оказаться неприемлемо большой.

Другой подход к решению целочисленных задач использует разнообразные правила эффективного сокращения множества целочисленных планов. Число планов любой задачи линейного программирования конечно. Поэтому конечным является и число целочисленных планов, которые, в принципе, можно последовательно перебрать и выбрать наилучший. Однако, в реальных задачах число планов велико настолько, что их перебор нереализуем. Методы эффективного перебора позволяют осуществить перебор лишь некоторых перспективных вариантов, отсеивая при этом очень большое число планов, которые заведомо не являются оптимальными. Центральная проблема здесь – построение эффективного решающего правила, позволяющего на основании имеющейся к текущему шагу информации отсеивать возможно большее число бесперспективных вариантов. Известны несколько методов, реализующих идею эффективного перебора применительно к задаче маршрутизации. К их числу относятся: метод последовательного конструирования, анализа и отбора вариантов [6], метод Балаша [8] и метод ветвей и границ [4]. Технология построения соответствующих алгоритмов однотипна. Множество

вариантов описывается в виде дерева, каждой ветви которого соответствует конкретный план задачи. Решение начинается с выбора некоторой конкретной ветви, для которой вычисляется значение целевой функции – длина маршрута. Полученную длину называют эталонной. Затем выбирается другая ветвь и начинается движение вдоль неё, начиная от вершины. Пусть сделано несколько шагов, определяющих начальный участок маршрута, и вычислена его длина. Далее предполагается, что имеется возможность расчета оптимистической оценки длины оставшейся части маршрута и, таким образом, оптимистической оценки длины всего маршрута. Полученная оценка сравнивается с эталонной. Понятно, что в случае, если оптимистическая длина хуже, чем длина эталонной ветви, то рассматриваемый начальный участок ветви порождает куст бесперспективных ветвей и его можно не продолжать. Последовательное применение этой технологии позволяет эффективно сокращать число переборов вариантов. Перечисленные методы отличаются друг от друга способом расчета оптимистических оценок. Общий недостаток методов эффективного перебора состоит в экспоненциально быстром росте числа вариантов маршрутов в зависимости от возможного числа промежуточных пунктов. Кроме того, все эти методы плохо учитывают специфику задач маршрутизации. В связи с этим отметим, что актуальность и практическая потребность в решении задачи маршрутизации привели к разработке методов, ориентированных на существо и особенности именно этой задачи. Наиболее успешные из них используют идеи «коллективного интеллекта». Построенные на этой идее методы отыскания кратчайшего маршрута реализуют способы поиска, имитирующие поведение «коллектива» живых организмов. Системы коллективного интеллекта состоят из множества агентов, взаимодействующих между собой и внешней средой. Анализ совместной деятельности множества локальных агентов колоний позволяет построить совокупность методов эффективного поиска рационального маршрута, которые получили название «роевые алгоритмы» [9]. К их числу относятся: муравьиный алгоритм [10, 11], алгоритм роя частиц [12], метод дифференциальной эволюции [13].

Основные принципы работы таких алгоритмов рассмотрим на примере муравьиного алгоритма. Поиск оптимального маршрута происходит следующим образом. Каждый муравей движется в поисках пищи случайным образом. При этом, если из некоторого конкретного пункта имеется N путей, то вероятность выбора i -го пути вычисляется по формуле

$$P_i = \frac{l_i^q f_i^p}{\sum_{k=1}^N l_k^q f_k^p},$$

где l_i – длина перехода по i -му пути,

f_i – количество феромона на i -м пути,

q – величина, определяющая «жадность» алгоритма,
 p – величина, определяющая «стадность» алгоритма,
 $p + q = 1$.

Если этот муравей находит источник пищи, он возвращается к муравейнику, оставляя за собой феромоновый след. Ближайшие муравьи, обнаружив след, движутся по отмеченному феромоном пути, усиливая его. Таким образом, удачный маршрут подтверждается и усиливается, а неудачные ослабевают, так как феромон выветривается.

Алгоритм роя частиц – это метод численной многомерной оптимизации нулевого порядка. Для реализации алгоритма не требуется вычисление градиента оптимизируемой функции. Алгоритм работает следующим образом. Цель реализуемой в алгоритме вычислительной процедуры – найти в многомерном координатном пространстве точки, соответствующие максимальному значению целевой функции. Поиск осуществляется путем перемещения в этом пространстве множества частиц, положение каждой из которых в каждый момент времени задано своими координатами. При этом для каждой частицы известно её наилучшее положение в прошлом. Кроме того, известно наилучшее положение для всего роя частиц. Направление перемещения каждой частицы на очередном шаге определяется случайным образом, исходя из равномерного распределения, а скорость выбирается исходя из компромисса между удалениями до наилучших положений в прошлом. Для нового положения вычисляется значение целевой функции, которое запоминается, если оно лучше предыдущих. Останов процедуры происходит, если в течение некоторого заданного числа шагов не произошло удешевления значения целевой функции.

Наконец, метод дифференциальной эволюции организован в виде пошаговой процедуры поиска точки в многомерном пространстве с наилучшим значением целевой функции и имеет много общего с алгоритмом роя частиц. В процессе работы метода формируется некоторое множество точек со своими координатами. На очередном шаге формируется новое поколение точек. При этом для каждой точки из старого поколения случайным образом выбирается ещё три разные точки из старого поколения, линейная комбинация которых определяет так называемую мутантную точку. Эта мутантная точка скрещивается (путем обмена некоторых координат) с исходной точкой. Полученная точка называется пробной. Если значение целевой функции в пробной точке лучше, чем её значение в исходной точке, то пробная точка заменяет исходную. Процедура останавливается, если в течение некоторого числа итераций не произошло улучшения целевой функции. Из приведенного описания метода дифференциальной диагностики ясно, что он является одной из модификаций генетического алгоритма.

Алгоритмы этого типа могут успешно применяться при решении многих задач маршрутизации в

случаях, когда задача состоит в построении рационального маршрута в целях его дальнейшего многократного использования. Однако они совершенно не пригодны для быстрого решения множества задач маршрутизации с разными пунктами назначения. В связи с этим поставим задачу построения метода отыскания маршрута в реальном времени между известным начальным пунктом и случайным конечным пунктом.

Цель исследования. Постановка задачи. Цель исследования состоит в разработке метода, обеспечивающего построение кратчайшего маршрута между заданными начальным и конечным пунктами, с учетом реальных транспортных магистралей. Положение всех пунктов задано их координатами в декартовой системе координат. В рассматриваемой задаче доставки изготавливаемого продукта от производителя к конкретному потребителю по его требованию задача маршрутизации должна решаться немедленно и максимально быстро, поскольку малое время доставки продукта – одно из основных требований к системе. В связи с этим целесообразно отказаться от поиска алгоритма, обеспечивающего отыскание кратчайшего маршрута. В практических целях поставим задачу нахождения короткого маршрута, близкого к оптимальному, но зато предельно быстро.

Метод отыскания короткого маршрута в реальном времени. Пусть заданы n пунктов, для каждой пары из которых нужно найти кратчайший маршрут. Пункты соединены между собой дугами, обозначающими возможность перехода из одного в другой. Каждой дуге приписаны два числа, определяющие длину дуги при движении в прямом и обратном направлениях. Таким образом, получен ориентированный граф. Технологию решения задачи удобно иллюстрировать на конкретном примере.

Пусть ориентированный граф имеет вид, представленный на рис. 1. Информация, приведенная на рисунке, также отображена в приводимой ниже матрице длин одношаговых переходов между пунктами M_1 .

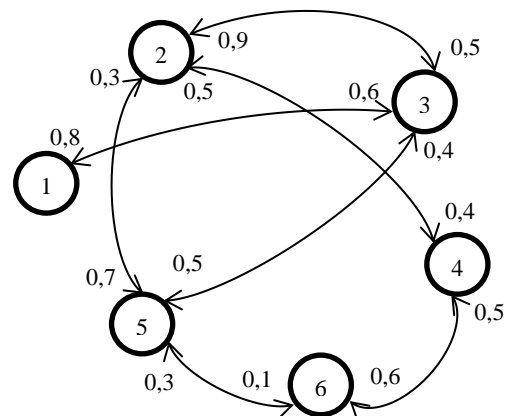


Рис. 1 – Граф переходов в системе из шести пунктов

Матрица длин одношаговых переходов между пунктами следующая:

$$M_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} \infty & G & 0,6 & G & G & G \\ G & \infty & 0,5 & 0,4 & 0,7 & G \\ 0,8 & 0,9 & \infty & G & 0,5 & G \\ G & 0,5 & G & \infty & G & 0,6 \\ G & 0,3 & 0,4 & G & \infty & 0,1 \\ G & G & G & 0,5 & 0,3 & \infty \end{matrix} \end{matrix}.$$

В матрице M_1 символом G для элемента (i, j) обозначена ситуация, когда между пунктами i и j одношаговый переход отсутствует.

Определим теперь длины кратчайших двухшаговых переходов между пунктами. С этой целью введем специальную операцию компиляции матриц. Для двух квадратных матриц $A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$ введем матрицу $C = (c_{ij})$, элементы которой рассчитываются по правилу

$$c_{ij} = \min_k \{a_{ik} + b_{kj}\}, \quad (5)$$

$$\dim A = \dim B = \dim C = n \times n,$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

В матричной форме эту операцию запишем формулой $C = A \oplus B$.

С использованием операции (5) осуществим расчет матрицы $M_2 = M_1 \oplus M_1$:

$$M_2 = M_1 \oplus M_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} \infty & G & 0,6 & G & G & G \\ G & \infty & 0,5 & 0,4 & 0,7 & G \\ 0,8 & 0,9 & \infty & G & 0,5 & G \\ G & 0,5 & G & \infty & G & 0,6 \\ G & 0,3 & 0,4 & G & \infty & 0,1 \\ G & G & G & 0,5 & 0,3 & \infty \end{matrix} \oplus \end{matrix}$$

$$\oplus \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} \infty & G & 0,6 & G & G & G \\ G & \infty & 0,5 & 0,4 & 0,7 & G \\ 0,8 & 0,9 & \infty & G & 0,5 & G \\ G & 0,5 & G & \infty & G & 0,6 \\ G & 0,3 & 0,4 & G & \infty & 0,1 \\ G & G & G & 0,5 & 0,3 & \infty \end{matrix} =$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} G & 1,5 & 0,6 & G & 1,1 & G \\ 1,3 & G & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,8 \\ 0,8 & 0,8 & G & 1,3 & 0,5 & 0,6 \\ G & 0,5 & 1 & G & 0,9 & 0,6 \\ 1,2 & 0,3 & 0,4 & 0,6 & G & 0,1 \\ G & 0,6 & 0,6 & 0,5 & 0,3 & G \end{matrix} \end{matrix}.$$

Ниже приведены несколько примеров расчета длины двухшаговых путей:

$$S_{26} = \min\{(S_{24} + S_{46}), (S_{25} + S_{56})\} =$$

$$= \min\{(0,4 + 0,6), (0,7 + 0,1)\} = 0,8,$$

$$S_{32} = \min\{S_{32}, (S_{35} + S_{52})\} =$$

$$= \min\{0,9, (0,5 + 0,3)\} = 0,8,$$

$$S_{45} = \min\{(S_{46} + S_{65}), (S_{42} + S_{25})\} =$$

$$= \min\{(0,6 + 0,3), (0,5 + 0,7)\} = 0,9;$$

$$S_{54} = \min\{(S_{52} + S_{24}), (S_{56} + S_{64})\} =$$

$$= \min\{(0,3 + 0,4), (0,1 + 0,5)\} = 0,6;$$

$$S_{62} = \min\{(S_{64} + S_{42}), (S_{65} + S_{52})\} =$$

$$= \min\{(0,5 + 0,5), (0,3 + 0,3)\} = 0,6.$$

Отметим, что в матрице M_2 меньше элементов, отмеченных символом G . Это означает, что предложенная процедура (5) выявляет кратчайшие двухшаговые пути, соединяющие пункты, которые непосредственно не связаны между собой. Однако, поскольку такие элементы в M_2 все же присутствуют, сделаем ещё один шаг расчетов, результаты которых определят наличие и эффективность трехшаговых путей:

$$M_3 = M_2 \oplus M_1 = (S_{ij}^3) =$$

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} G & 1,5 & 0,6 & G & 1,1 & G \\ 1,3 & G & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,8 \\ 0,8 & 0,8 & G & 1,3 & 0,5 & 0,6 \\ G & 0,5 & 1 & G & 0,9 & 0,6 \\ 1,2 & 0,3 & 0,4 & 0,6 & G & 0,1 \\ G & 0,6 & 0,6 & 0,5 & 0,3 & G \end{matrix} \oplus \end{matrix}$$

$$\oplus \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} \infty & G & 0,6 & G & G & G \\ G & \infty & 0,5 & 0,4 & 0,7 & G \\ 0,8 & 0,9 & \infty & G & 0,5 & G \\ G & 0,5 & G & \infty & G & 0,6 \\ G & 0,3 & 0,4 & G & \infty & 0,1 \\ G & G & G & 0,5 & 0,3 & \infty \end{matrix} =$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{matrix} G & 1,1 & 0,6 & 1,8 & 1,1 & 1,2 \\ 1,3 & G & 0,5 & 0,4 & 0,7 & 0,8 \\ 0,8 & 0,9 & G & 1,1 & 0,5 & 0,6 \\ 1,8 & 0,5 & 1 & G & 0,9 & 0,6 \\ 1,2 & 0,3 & 0,4 & 0,6 & G & 0,1 \\ 1,5 & 0,6 & 0,7 & 0,5 & 0,3 & G \end{matrix} \end{matrix}.$$

В матрице M_3 уже не осталось элементов, помеченных символом G . Это значит, что в приведенной системе пунктов любой из них достигим из любого другого не более, чем за три перехода. Поэтому дальнейшие расчёты уже не нужны. Завершающая часть алгоритма отыскания матрицы кратчайших путей состоит в следующем.

Итоговая матрица M_3 содержит значения кратчайших путей от каждого из пунктов к каждому. Для практического использования этой матрицы её необходимо дополнить ещё одной матрицей, содержащей для каждой пары «начальный пункт – конечный пункт» информацию о номерах промежуточных пунктов оптимального маршрута. Эта матрица для данной задачи имеет вид, приведенный в табл. 1.

Таблица 1 – Перечень номеров пунктов маршрута

	1	2	3	4	5	6
1	–	1, 3, 2	1, 3	1, 3, 2, 4	1, 3, 5	1, 3, 5, 6
2	2, 3, 1	–	2, 3	2, 4	2, 5	2, 5, 6
3	3, 1	3, 2	–	5, 6, 4	3, 5	3, 5, 6
4	4, 2, 3, 1	4, 2	4, 2, 3	–	4, 6, 5	4, 6
5	5, 3, 1	5, 2	5, 3	5, 6, 4	–	5, 6
6	6, 5, 3, 1	6, 5, 2	6, 5, 3	6, 4	6, 5	–

Следует отметить высокую скорость описанного метода отыскания кратчайших путей. Для системы содержащей n пунктов необходимо не более n раз выполнить операцию компиляции, реализация которой требует $\approx n^3$ элементарных операций. Тогда общее число операций при решении задачи имеет порядок $N = n^4$. Если $n = 32$, то $N \cong (2^5)^4 = 2^{20} \cong 10^6$.

Рассмотрим теперь возможность применения предложенной технологии для построения кратчайших маршрутов в задаче организации поставок в системе «производитель – множество потребителей», произвольным образом распределенных в районах города. На карте города построим прямоугольник, охватывающий все его районы. Этот прямоугольник разобьём на квадраты, со стороной, равной l км. Пусть в результате разбиения получено N квадратов, которые перенумеруем по порядку, $i = 1, 2, \dots, N$. На рис. 2 приведен пример такого разбиения.

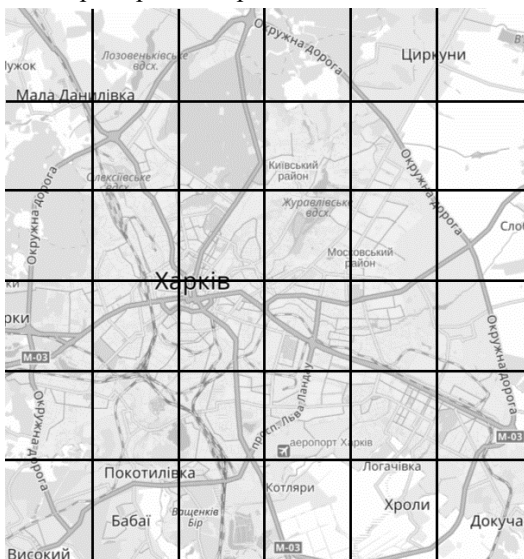


Рис. 2 – Разбиение территории города по квадратам

Одновременно формируется аналог табл. 1, определяющей последовательность прохождения квадратов. В реальной ситуации для отыскания кратчайшего маршрута от производителя до конкретного потреби-

теля выполняются следующие операции. Сначала по координатам заказчика отыскивается номер квадрата, в котором он находится. Затем, используя матрицу M_3 , а также соответствующую ей табл. 1, отыскивается рациональная последовательность прохождения квадратов, принадлежащих искомому маршруту. После попадания в последний квадрат, накрывающий место расположения потребителя, завещающий участок маршрута находится непосредственно. Получаемый в результате маршрут не является гарантированно кратчайшим, однако многочисленные эксперименты показали, что этот маршрут близок к нему.

Задача существенно усложняется, если в качестве критерия эффективности маршрутизации использовать не длину маршрута, а продолжительность его прохождения. Возникающая в этой задаче неопределенность в отношении времени прохождения каждого участка маршрута связана с влиянием на это время множества трудно учитываемых факторов (время года, время суток, погодные условия и т. д.). Решение задачи в этой ситуации возможно с использованием теоретико-вероятностных моделей [14–17] или с привлечением моделей нечеткой математики [18, 19].

Выводы. Проведенный анализ известных методов отыскания кратчайшего маршрута показал, что они не могут быть реализованы для решения таких задач в реальном времени.

Предложена простая вычислительная процедура, которая обеспечивает быстрое нахождение кратчайшего маршрута с приемлемой точностью.

Список литературы

1. Юдин Д. Б. Задачи и методы линейного программирования / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. – М. : Сов. радио, 1961. – 494 с.
2. Раскин Л. Г. Многомерные задачи линейного программирования / Л. Г. Раскин. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.
3. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы / Т. Саати. – М. : Мир, 1973. – 304 с.
4. Литтл Дж. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере / Дж. Литтл, К. Мурти, Д. Суни. // Экономика и математические методы. – 1965. – Т. 1, Вып. 1 – С. 94–107 с.
5. Гомори Р. Численные методы оптимального планирования / Р. Гомори, У. Бомоль. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962. – С. 58–72.
6. Михалевич В. С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение. / В. С. Михалевич // Кибернетика. – 1965. – № 1. – С. 16–28.
7. Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Фinkelштейн. – М. : Наука, 1969. – 284 с.
8. Balas E. Solution of Large Scale Transportation Problems Through Aggregation / E. Balas // Operations Research. – 1965. – Vol. 13. – pp. 82–93.
9. Миллер П. Роевой интеллект: Муравьи, пчелы и птицы способны многому нас научить // П. Миллер, / National Geographic Россия. – 2007. – № 8. – С. 88–107.
10. Ignatyev A. L. Solving the Travelling Salesman Problem on Shared and Distributed Memory Multiprocessor Systems / A. L. Ignatyev, M. A. Posypkin, I. Kh. Sigal // Proceeding International conference "Optimization and applications". – Petrovac, Montenegro. – 2009. – P. 36–39.
11. Kravets P. The control agent with fuzzy logic / P. Kravets // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH'2010 – Proceedings of the 6th International Conference. – Lviv, – 2010. – P. 40–41.
12. Bel J. E. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem / J. E. Bell, P. R. McMullen // Advanced Engineering Informatics. – 2004. – Vol. 18. – P. 41–48.

13. Dorigo M. Ant algorithms for discrete optimization / Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L. M. // *Artificial Life*. – 1999. – Vol. 5. – P. 137–172.
14. Раскин Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории управления / Л. Г. Раскин. – М.: Сов. Радио, 1976. – 344 с.
15. Пигнастый О. М. Статистическая теория производственных систем / О. М. Пигнастый. – Х.: ХНУ им. Каразина, 2007. – 388 с.
16. Пигнастый О. М. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый // *Доповіди Нац. академії наук*. – 2005. – № 7. – С. 66–71.
17. Демуцкий В. П. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый. – Х.: ХНУ им. Каразина, 2003. – 272 с.
18. Серая О. В. Многомерные модели логистики в условиях неопределенности / О. В. Серая. – Х.: ФОП Стеценко, 2010. – 512 с.
19. Серая О. В. Модели и информационные технологии оценки и прогнозирования состояния многомерных динамических объектов в условиях нечетких исходных данных: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 : утв. 17.01.02 / О. В. Серая. – Х.: 2001. – 252 с.
8. Balas E. Solution of Large Scale Transportation Problems Through Aggregation. *Operations Research*. 1965, vol. 13, pp. 82–93.
9. Myller P. Rovevoy yntellekt: Murav'y, pcheli y ptytsi sposobni mnohomu nas nachyt' [Swarm intelligence: Ants, bees, and birds can teach us a lot]. *National Geographic Rossyya*. 2007, no. 8, pp. 88–107.
10. Ignatyev A. L. Solving the Travelling Salesman Problem on Shared and Distributed Memory Multiprocessor Systems. *Proceeding International conference "Optimization and applications"*. Petrovac, Montenegro, 2009, pp. 36–39.
11. Kravets P. The control agent with fuzzy logic. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design "MEMSTECH'2010"*, *Proceedings of the 6th International Conference*. Lviv, 2010, pp. 40–41.
12. Bel J. E. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*. 2004, vol. 18, pp. 41–48.
13. Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L. M. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*. 1999, vol. 5, pp. 137–172.
14. Ruskin L. G. *Analiz slozhnyh sistem i jelementy teorii upravlenij* [The analysis of complex systems and controls theory]. Moscow, Sov. Radyo Publ., 1976, 344 p.
15. Pynhasty O. M. *Statystycheskaya teoryya proyzvodstvenikh system* [Statistical theory of production systems]. Kharkov, KhNU im. Karazyna Publ., 2007, 388 p.
16. Demutskyy V. P., Pynhastaya V. S., Pynhasty O. M. Stokhastycheskoe opysanie ekonomyko-proyzvodstvennikh system s massovim vipuskom produktsyy [Stochastic description of the economic and production systems to mass production]. *Dopovidi Nats. akademiyi nauk*. 2005, no. 7, pp. 66–71.
17. Demutskyy V. P., Pynhastaya V. S., Pynhasty O. M. *Teoryya predpryatyaya: Ustoychyvost funktsyonyrovanyya massovoho proyzvodstva y prodvyzhenyya produktsyy na rinok* [Enterprise theory: Stability of functioning of mass production and promotion of products on the market]. Kharkov, KhNU im. Karazyna Publ., 2003, 272 p.
18. Seraya O. V. *Mnohomernie modeli lohystyky v uslovyakh neopredelemnosti* [Multivariate logistic models under uncertainty]. Kharkiv, FOP Stetsenko Publ., 2010, 512 p.
19. Seraya O. V. *Modeli i informatsionnyye tehnologii otsenki i prognozirovaniya sostoyaniya mnogomernykh dinamicheskikh ob'ektov v usloviyah nechetkikh ishodnykh dannyyh. dis. ... kand. tekhn. nauk* 05.13.06 [Models and information technology assessment and forecasting of multivariate dynamic objects in a fuzzy initial data. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2001, 252 p.

References (transliterated)

1. Yudyn D. B., Hol'shteyn E. H. *Zadachy u metodi lyneynoho prohrannyrovanyya* [Objectives and methods of linear programming]. Moscow, Sov. radyo Publ., 1961. 494 p.
2. Raskyn L. H. *Mnohomernie zadachy lyneynoho prohrannyrovanyya* [Multivariate linear programming problem]. Moscow, Radyo y svyaz' Publ., 1982. 240 p.
3. Saaty T. *Tselochyslenne metody optimyzatsyy u svyazannye s nymy ekstremal'nye problemi* [Integer optimization techniques and associated extreme problems]. Moscow, Myr Publ., 1973. 304 p.
4. Lyttl Dzh., Murty K., Suyny D. Alhorytm dlya reshenyya zadachy o kommyvoyazhere [The algorithm for solving the traveling salesman problem]. *Ekonomyka y matematycheskye metody*. 1965, vol. 1, no. 1, pp. 94–107.
5. Homory R., Bomol' U. *Chyslenne metody optimal'noho planyrovanyya* [Numerical methods of optimal planning]. Novosybyrsk, SO AN SSSR Publ., 1962, pp. 58–72.
6. Mykhalevych V. S. Alhorytm dlya reshenyya zadachy o kommyvoyazhere [Posledovatel'nie alhorytmi optimyzatsyy u ykh pryemnenenye]. *Kybernetyka*. 1965, vol. 1, pp. 16–28.
7. Korbut A. A., Fynkel'shteyn Yu. Yu. *Dyskretnoe prohrannyrovanye* [Discrete programming]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 284 p.

Поступила (received) 06.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метод вирішення задачі маршрутизації у реальному часі / В. В. Карпенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 59–64. – Бібліогр.: 19 назв. – ISSN 2079–0023.

Метод решения задачи маршрутизации в реальном времени / В. В. Карпенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 59–64. – Библиогр.: 19 назв. – ISSN 2079–0023.

The method of solving the problem of routing in real time / V. V. Karpenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 59–64. – Bibliogr.: 19. – ISSN 2079–0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Карпенко Вячеслав Васильович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри Комп'ютерного моніторингу та логістики; тел.: (093) 643–19–39; e-mail: Karpenko@kml.kh.ua.

Карпенко Вячеслав Васильевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры Компьютерного мониторинга и логистики; тел.: (093) 643–19–39; e-mail: Karpenko@kml.kh.ua.

Karpenko Vyacheslav Vasilevich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer Department of Computer Monitoring and logistics; tel.: (093) 643–19–39; e-mail: Karpenko@kml.kh.ua.

В. М. ЛЕВЬКИН, О. В. ЧАЛАЯ

МЕТОД АКТУАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЕ-ЕМКИХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В роботі удосконалено модель циклу управління бізнес-процесом, яка відрізняється від існуючих включенням задачі актуалізації, що передбачає приведення знань про процес у відповідність з його поточним поведінкою. Це дає можливість відкоригувати модель знання-ємного бізнес-процесу під час його виконання. Запропоновано метод актуалізації знання-ємних бізнес-процесів. Метод спрямований на приведення в актуальний стан формалізованих знань про бізнес-процес. Метод включає в себе фази виділення обмежень, виділення керуючих правил, а також відбору правил і обмежень з урахуванням показників ефективності та результативності. Метод забезпечує можливість формалізації у вигляді бізнес-правил знань виконавців, які були використані при управлінні ходом виконання знання-ємного бізнес-процесу.

Ключові слова: знання-ємний бізнес-процес, інтелектуальний аналіз процесів, процесне управління, контекст, артефакт.

В работе усовершенствована модель цикла управления бизнес-процессом, которая отличается от существующих включением задачи актуализации, предусматривающей приведение знаний о процессе в соответствие с его текущим поведением, что позволяет откорректировать модель знание-емкого бизнес-процесса во время его выполнения. Предложен метод актуализации знание-емких бизнес-процессов. Метод направлен на приведение в актуальное состояние формализованных знаний о бизнес-процессе. Метод включает в себя фазы выделения ограничений, выделения управляющих правил, а также отбора правил и ограничений с учетом показателей эффективности и результативности. Метод обеспечивает возможность формализации в виде бизнес-правил знаний исполнителей, которые были использованы при управлении ходом выполнения знание-емкого бизнес-процесса.

Ключевые слова: знание-емкий бизнес-процесс, интеллектуальный анализ процессов, процессное управление, контекст, артефакт.

In this paper, improved model of management cycle of business process is proposed. The model differs from the existing ones that it use task of updating to bring into line with its current behavior by providing knowledge about the process. This allows you to adjust the model of knowledge-capacious business process during its execution. The method of updating the knowledge-intensive business processes is proposed. The method aims to bring up to date a formal knowledge about the business process. The method includes the phase separation constraints, allocation of control rules, as well as the selection rules and restrictions based on indicators of effectiveness and efficiency. The method enables the formalization of knowledge of performers in form of the business rules. That knowledge has been used by workers in the management of the knowledge-intensive business process.

Keywords: knowledge-intensive business process, intelligent process analysis, process control, context, artifact.

Введение. В настоящее время выделяют два основных подхода к управлению предприятием: функциональный и процессный. Функциональный подход основан на иерархической детализации действий по решению стоящих перед предприятием функциональных задач. Иерархия действий обычно выстраивается с учетом организационной структуры предприятия.

Процессный подход основан на выделении последовательностей действий по решению функциональных задач без привязки к организационной иерархии предприятия. Такие последовательности действий, которые по заданной технологии преобразуют ресурсы на входе в продукты или услуги на выходе, называют бизнес-процессами (БП) [1]. Процессное управление предприятием реализуется посредством управления бизнес-процессами на основе их априорно построенных моделей [2].

Построение моделей бизнес-процессов, а также их конфигурирование в информационной управляющей системе осуществляется с учетом корпоративной политики, промышленных стандартов, корпоративной культуры. Такие стандарты, политика, культура формализуются в форме бизнес-правил (БПр) [3]. Последние определяют границы поведения процесса и возможности достижения результатов в условиях текущего состояния предметной области. Правила обычно известны априорно, что позволяет учесть их на этапе конфигурирования, до запуска бизнес-процесса на выполнение.

Однако реализация основанного на правилах подхода связана со значительными трудностями для знание-емких бизнес-процессов (ЗБП), поскольку

последние изменяют последовательность своих действий на основе решений исполнителей (knowledge workers) [4]. При принятии решений о модификации хода процесса исполнители используют как общедоступные явные знания, так и персональные знания и опыт [5]. Персональные знания обычно отражают недокументированные бизнес-правила и потому не включаются в модель процесса при ее создании и конфигурировании.

Таким образом, для данного класса процессов на этапе конфигурирования используется подмножество представленных в форме документов бизнес-правил. Управление ЗБП осуществляют исполнители на основе другого подмножества бизнес-правил, представленных в неформальной форме, что требует внедрения подхода к актуализации знаний о бизнес-процессе во время его выполнения. Такой подход должен включать этапы выявления и использования персональных бизнес-правил исполнителей. Отметим, что персональные бизнес-правила обычно отражают особенности функционирования отдельных подразделений организации с учетом текущего состояния предметной области, что позволяет сочетать возможности процессного и функционального управления. Изложенное определяет актуальность темы данной работы.

Анализ последних исследований и публикации. Ключевая особенность знание-емких бизнес-процессов состоит в том, что при их выполнении используются как явные так неявные знания [4]. При этом неявные правила управления, а также ограничения на выполнение БП обладают следующими характеристиками [3, 5]:

– учитывают текущее состояние контекста бизнес-процесса;

– представлены в неявном виде;

– не отражены в его формальной модели.

Приведенные особенности реализации процессного подхода для знание-емких бизнес-процессов приводят к тому, что исполнители могут применять более эффективные и безопасные способы управления ЗБП по сравнению с представленными в формальной модели [5].

Для того чтобы преодолеть указанный недостаток, необходимо выполнить актуализацию бизнес-процесса путем преобразования знаний об управляющих правилах и ограничениях в явную форму, что позволит использовать их при дальнейшем выполнении ЗБП. Задача экстернализации требует разработки формальных подходов к выделению таких неявных персональных знаний [6].

При выявлении и формализации используемых для управления знаний персонала необходимо учитывать то, что процессно-ориентированные информационно-управляющие системы фиксируют следы применения таких неявных правил в логах процессов. Это дает возможность извлечь неявные бизнес-правила во время выполнения ЗБП на основе анализа лога процесса методами process mining [7]. Затем управляющие воздействия могут быть реализованы на основе полученных БПр. Однако вопросы актуализации знаний об управлении ЗБП во время его выполнения на основе анализа логов процессов в настоящее время разработаны недостаточно.

Целью данной статьи является разработка обобщенного метода актуализации знаний об управлении знание-емким бизнес-процессом во время его выполнения на основе преобразования зафиксированных в логе зависимостей в бизнес-правила. Последние задают как ограничения на ход выполнения ЗБП, так и новые, не учтенные в модели возможности эффективного управления с учетом текущего состояния среды выполнения процесса.

Модель цикла управления знание-емким бизнес-процессом. Цикл управления БП предусматривает решение следующих задач (рис. 1):

– построение модели БП, отражающей последовательность шагов по решению функциональной задачи с учетом затрат времени и материальных ресурсов;

– анализ модели с целью выявления «узких мест», а также участков с блокировкой ресурсов у методами имитационного моделирования;

– внедрение процесса, при котором его декларативное описание преобразуется в исполняемую модель; выполняется также документирование полученной модели с целью его последующего сопровождения и возможного тиражирования;

– развертывание (конфигурирование), при котором экземпляр бизнес-процесса настраивается средствами процессной информационно-управляющей системы;

– выполнение бизнес-процесса в соответствии с разработанной моделью;



Рис. 1 – Цикл управления знание-емким бизнес-процессом

– мониторинг выполнения бизнес-процесса, при котором отслеживаются показатели эффективности и результативности БП;

– перепроектирование и усовершенствование бизнес-процесса, при котором его структура изменяется с целью оптимизация показателей и приведение данных, необходимых для принятия управленческих решений, к актуальному виду.

Результатом выполнения первой задачи является модель процесса, которая включает в себя наборы исполнителей и их ролей, а также возможные последовательности действий по решению задачи, которые реализуются исполнителями.

При решении второй задачи выполняется оценка времени и ресурсов для отдельных действий бизнес-процесса. Затем осуществляется имитационное моделирование процесса в соответствии с полученной на первом этапе моделью. Имитационное моделирование позволяет:

- оценить среднее время выполнения БП;
- найти отклонения от среднего времени, обеспечивающий заданный уровень качества обслуживания;
- выявить узкие места, влияющие на производительность, а также возможные тупиковые ситуации;
- определить ресурсы, которые необходимы для полного выполнения бизнес-процесса при заданном уровне качества обслуживания;
- сформировать подходы к усовершенствованию бизнес-процесса (при необходимости), чтобы получить модель «как должно быть».

Результатом выполнения третьей задачи является модель исполняемого процесса, которая определяет не только его поток работ, но и используемые объекты, особенности их трансформации при использовании, возможные исключительные ситуации, а также требования к ресурсам, учитывающие регулирующие документы.

Задача конфигурирования и развертывания состоит в том, чтобы связать в единое целое используемые подсистемы на основе заданных шаблонов манипулирования данными, обработки исключительных ситуаций, обмена сообщениями. В качестве шаблонов обработки данных, ситуаций и т. п. могут быть использованы бизнес-правила.

Задача мониторинга заключается в измерении ключевых показателей процессов, позволяющих оценить их производительность и уровень соответствия требованиям к качеству обслуживания. В рамках данной задачи выполняется расчет показателей эффективности и результативности. Первый показатель позволяет оценить результат процесса не единицу затрат ресурсов, а второй – выявить степень отклонения от запланированных результатов.

При решении данной задачи также отслеживаются события, отражающие выполнение бизнес-процесса. Каждое событие отражает выполнение действия процесса и характеризуется набором значений атрибутов объектов, с которыми взаимодействует БП. Указанные события фиксируются в логе процесса.

При решении задачи перепроектирования на основе модели процесса «как есть» создается улучшенная модель «как должно быть». При этом используются накопленные данные о выполнении процесса. В рамках данной задачи также выполняется актуализация документации о процессе.

Знание-емкие бизнес-процессы отличаются тем, что модель их выполнения может быть изменена исполнителями на основе своих знаний. Эти знания фактически представляют собой скрытые, не отраженные в модели процесса бизнес-правила.

Бизнес-правила определяют или ограничивают аспекты как деятельности предприятия в целом, так и бизнес-процессов в частности. В рамках задачи актуализации ЗБП предлагается выделить две категории бизнес-правил: ограничивающие и управляющие:

$$Br = Br^{\text{lim}} \cup Br^{\text{ctrl}} \quad (1)$$

где Br^{lim} – ограничения на выполнение БП; Br – управляющие бизнес-правила.

Правила-ограничения в общем случае обеспечивают достижение заданных показателей результативности и эффективности.

Управляющие правила определяют выбор последовательности действий по решению функциональной задачи в рамках бизнес-процесса.

К первой категории относятся следующие известные виды правил:

- факты (инварианты), которые определяют некоторые утверждения о бизнес-процессах;
- ограничения на выполнение операций;
- вычисления, задающие связи между фактами через некий вычислительный алгоритм.

Ко второй категории относятся следующие виды правил:

- активаторы операций, определяющие выполнение действий в некоторых условиях;
- выводы, задающие новые факты на основе подмножества условий.

Отметим, что правила-выводы при процессном подходе в общем случае соответствуют действиям, которые выполнялись для заданного подмножества условий и результатом которых являются новые факты.

Пусть структурно ЗБП представляется следующим коротжем:

$$BP = \langle Ct, Br, Wf \rangle, \quad (2)$$

где Ct – контекст бизнес-процесса; Br – набор бизнес-правил; Wf – набор последовательностей действий бизнес-процесса.

Тогда задача актуализации заключается в нахождении извлечения из журнала регистрации событий новых управляющих правил при полученных в результате анализа ограничениях:

$$Al : \Pi \rightarrow Br^{\text{ctrl}} \mid Br^{\text{lim}}, \quad (3)$$

где Π – журнал регистрации событий, который содержит набор последовательностей событий, причем каждая из последовательностей отражает однократное выполнение бизнес-процесса.

Метод актуализации знаний о знание-емком бизнес-процессе.

Для решения рассмотренной задачи предлагается метод актуализации знаний в формате бизнес-правил (рис.2).

Особенность метода состоит в разделении фаз выявления ограничений (этапы 1,2), управляющих правил (этапы 3,4) и отбора правил по показателям результативности (этап 5).

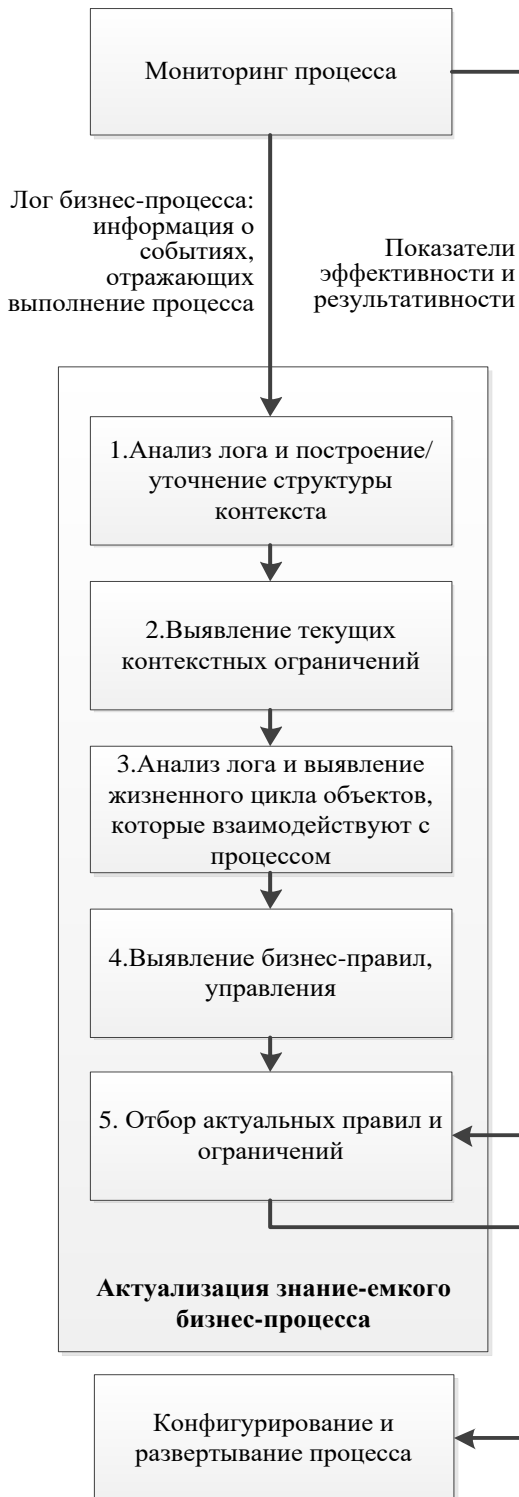


Рис. 2 – Последовательность этапов актуализации знание-емкого бизнес-процесса

На первой фазе основное внимание уделяется зависимостям между артефактами контекста. Контекст в данном случае рассматривается как совокупность взаимодействующих артефактов (объектов над которыми выполняются действия бизнес-процесса). Каждый артефакт характеризуется набором атрибутов, а его состояние – набором значений этих атрибутов. Поэтому связи между артефактами выражаются через связи между атрибутами артефактов. Возможность выявле-

ния таких связей обеспечивается тем обстоятельством, что каждое событие журнала процесса характеризуется набором значений атрибутов артефактов контекста.

Результатом данной фазы является набор ограниченный Br^{lim} , отражающих связи между атрибутами событий, а также между значениями этих атрибутов.

На второй фазе метода основное внимание уделяется выявлению связей между состоянием контекста и действиями процесса. Последние относятся к Wf – составляющей ЗБП. Такие связи экстернализуются при построении жизненного цикла артефактов бизнес-процесса. Результатом данной фазы является набор правил Br^{ctrl} , отражающих возможные варианты управления ЗБП.

На третьей фазе из множеств Br^{lim} и Br^{ctrl} удаляются правила, которые обладают следующими признаками: формализованы ранее и входят в модель бизнес-процесса; не удовлетворяют требованиям результативности.

В рамках предлагаемого подхода рассматривается только требование результативности, поскольку его можно проверить на основе анализа лога.

Выполнившиеся экземпляры процесса обычно заканчиваются событием с атрибутом, отражающим успешное завершение процесса, например с названием действия «completed». Поэтому правила, которые получены на основе обработки только неудачных экземпляров ЗБП, исключаются из финального множества. Отметим, что даже неверные экземпляры процесса могут иметь общие последовательности с успешными реализациями, на которых можно выявить правила и ограничения. Поэтому анализ на этапах 1–4 выполняется для всех экземпляров процесса

Выводы. Усовершенствована модель цикла управления бизнес-процессом, которая отличается от существующих наличием задачи актуализации БП. Задача актуализации предусматривает приведение знаний о процессе в соответствие с его текущим поведением. Это позволяет адаптировать модель знание-емкого бизнес-процесса во время его выполнения на основе знаний, используемых исполнителями для корректировки последовательности действий такого процесса и учитывающих текущее состояние его контекста.

Предложен метод актуализации знание-емких бизнес-процессов. Метод предназначен для приведения в актуальное состояние формализованных знаний о ЗБП. Входными данными метода являются результаты мониторинга бизнес-процесса: журналы регистрации событий и показатели результативности. Метод включает в себя фазы: выделения ограничений, на которой устанавливаются связи между артефактами контекста; выделения управляющих правил с использованием жизненного цикла объектов; отбора правил и ограничений на основе показателя результативности.

Метод обеспечивает возможность формализации в виде бизнес-правил и последующего включения в модель знаний исполнителей, которые были исполь-

зованы при управленні ходом виконання знание-емкого бизнес-процесса.

Список литературы

1. *Vom Brocke J. Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems / J. vom Brocke, M. Rosemann.* – Berlin: Springer-Verlag, 2015. – 709 p.
2. *Weske M. Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures. Second Edition / M. Weske.* – Berlin: Springer-Verlag, 2012. – 403 p.
3. *Semantics of Business Vocabulary and Business Rules (SBVR) / Object Management Group.* – Version 1.3, 2015. – 312 p. – <http://www.omg.org/spec/SBVR/1.3/PDF>.
4. *Gronau N. KMDL-Capturing, Analysing and Improving Knowledge-Intensive Business Processes / N. Gronau, C. Müller, R. Korf // Journal of Universal Computer Science.* – 2005. – № 11 (4). – P. 452–472.
5. *Gronau N. Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL: Comprehensive insights into theory and practice (English) / N. Gronau.* – Gito, 2012. – 522 p.
6. *El-Den J.A. Tacit knowledge externalization among geographically distributed small groups / J. A. El-Den.* – PhD Thesis's, University of Technology, Sydney, Australia, 2009. – 323 p.
7. *Van der Aalst W. M. P. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes / W. M. P. Van der Aalst.* – Springer, Berlin Heidelberg, 2011. – 352 p.

References (transliterated)

1. *Vom Brocke J. Handbook on Business Process Management 1. Introduction, Methods, and Information Systems.* Berlin, Springer-Verlag Publ., 2015. 709 p.
2. *Weske M. Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures.* Berlin, Springer-Verlag Publ., 2007. 368 p.
3. *Semantics of Business Vocabulary and Business Rules (SBVR) / Object Management Group.* – Version 1.3, 2015. – 312 p. – <http://www.omg.org/spec/SBVR/1.3/PDF>.
4. *Gronau N., Müller C., Korf R. KMDL-Capturing, Analysing and Improving Knowledge-Intensive Business Processes. Journal of Universal Computer Science.* 2005. no. 11 (4), pp. 452–472.
5. *Gronau N. Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL: Comprehensive insights into theory and practice (English),* Gito, 2012. 522 p.
6. *El-Den J.A. Tacit knowledge externalization among geographically distributed small groups,* PhD Thesis's, University of Technology, Sydney, Australia, 2009. 323 p.
7. *Van der Aalst W. M. P. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes,* Springer, Berlin Heidelberg, 2011. 352 p.

Поступила (received) 21.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метод актуалізації знання-ємних бізнес-процесів / В. М. Левикін, О. В. Чала // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 65–69. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Метод актуализации знание-емких бизнес-процессов / В. М. Левыкин, О. В. Чалая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217).. – С. 65–69. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

The method of updating the knowledge-intensive business processes / V. M. Levykin, O. V. Chala // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 65–69. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левикін Віктор Макарович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: levykinvictor@gmail.com.

Чала Оксана Вікторівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

Левыкин Виктор Макарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных управляющих систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: levykinvictor@gmail.com.

Чалая Оксана Викторовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

Levykin Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Control Systems of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-51; e-mail: levykinvictor@gmail.com.

Chala Oksana – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Control Systems of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-51; e-mail: oksana.chala@nure.ua.

С. Ф. ЧАЛЫЙ, И. Б. ПРИБЫЛЬНОВА

СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ ПРЕЦЕДЕНТОВ

У роботі запропонований ситуаційний підхід до подання і моделювання темпоральних знань прецеденту, що відрізняється використанням обмежень при доступі до ситуації, а також інтеграцією послідовності операцій, що забезпечують перехід між ситуаціями. Підхід створює умови для опису рішення задачі в складі прецеденту на декількох рівнях деталізації. Удосконалено ситуаційна модель подання знань в складі прецеденту, яка відрізняється від існуючих використанням транзакції, що реалізує перехід між ситуаціями і складається з послідовності дій, що відображають визначену послідовність зміни станів предметної області. У практичному аспекті виділення транзакцій дозволяє виділити тільки ті стани предметної області, які є істотними для побудови процесу рішення задачі в складі прецеденту і потім організувати логічний висновок на ситуаціях.

Ключові слова: вивід на основі прецедентів, ситуація, темпоральні знання, ситуаційне обчислення.

В работе предложен ситуационный подход к представлению и моделированию темпоральных знаний прецедента, отличающийся использованием ограничений при доступе к ситуации, а также интеграцией последовательности операций, обеспечивающих переход между ситуациями. Подход создает условия для описания решения задачи в составе прецедента на нескольких уровнях детализации. Усовершенствована ситуационная модель представления знаний в составе прецедента. Модель отличается от существующих использованием транзакционного описания перехода между ситуациями, состоящего из последовательности действий, отражающих определенную последовательность изменения состояний предметной области. В практическом аспекте выделение транзакций позволяет выделить только те состояния предметной области, которые являются существенными для построения процесса решения задачи в составе прецедента, и затем организовать логический вывод на ситуациях.

Ключевые слова: вывод на основе прецедентов, ситуация, темпоральные знания, ситуационное исчисление.

In this paper we propose a situational approach to reporting and modeling of temporal knowledge of precedent, wherein the use of restrictions on access to the situation, as well as the integration of workflow, providing a transition between the situations. Approach creates conditions for solving the problem in describing the composition of a precedent for multiple levels of detail. Improved situational model of knowledge representation in the composition of a precedent, which is different from the existing use of the transaction, which realizes the transition between the situations and consisting of a series of actions, reflect a predetermined sequence of changes in the states domain. The practical aspect of the allocation of the transaction allows select only those states of the subject areas that are essential for the construction of the problem solving process as part of a precedent and then organize the logical conclusion to the situation.

Keywords: case-based reasoning, situation, temporal knowledge, situational calculus.

Введение. Вывод на основе прецедентов (СВР – Case-Based Reasoning) основан на идее использования накопленного в результате решения известных задач опыта и знаний для решения вновь возникающих проблем. Термин «прецедент» означает имевший место случай или поведение в определенной ситуации, которые рассматриваются как образец для последующих случаев подобного рода [1].

Прецедент представляет собой структурированный фрагмент знания в заданной предметной области, который основан на имеющемся опыте и представляет собой образец достижения поставленной цели [2].

СВР – подход основан на том, что обычно эксперт при возникновении новой проблемы использует известные решения, адаптируя их с учетом особенностей рассматриваемой проблематики. Поэтому основанный на прецедентах подход заключается, во-первых, в нахождении и использовании похожих ситуаций, и, во-вторых, в постоянном накоплении и применении вновь полученного опыта.

Подходы к представлению прецедентов в значительной степени определяются свойствами используемых знаний. В частности, темпоральные знания о процессах и явлениях, которые изменяются во времени, обладают рядом особенностей: относительность во времени; ограниченность; необходимость выделения уровней детализации; наличие статической и динамической составляющих [3], которые приводят к трудностям при реализации прецедентного подхода.

Это требует разработки усовершенствованных подходов к представлению знаний в составе прецедентов. Изложенное определяет актуальность темы данной работы.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время разработан ряд базовых подходов к представлению темпоральных знаний, которые учитывают их специфические особенности, на основе использования темпоральных логик, ситуационного и событийного исчисления, удовлетворения временных ограничений [4–7].

Темпоральные логики обеспечивают формальную основу для описания изменений истинности утверждений во времени путем учета причинно-временных связей.

Событийное исчисление позволяет представить знания в составе прецедента в виде последовательности взаимосвязанных событий.

Ситуационное исчисление формализует темпоральные знания в виде наборов ситуаций, состояние которых может быть описано средствами темпоральной логики, а изменение состояний – как последовательность событий, отражающих результаты выполнения соответствующих действий.

Однако принятый в ситуационном исчислении подход предполагает, что переходы между ситуациями необходимо выполнять после каждого действия. Вопросам интеграции промежуточных операций в единое интегральное действие не уделяется достаточно внимания [1].

Целью данной статьи является разработка ситуационного подхода к представлению темпоральных знаний в составе прецедента.

Это дает возможность решать задачу подбора прецедентов на основе оценки близости ситуаций, а также реализовать решение практических задач путем логического вывода на ситуациях.

Исходные ситуации могут быть получены на основе анализа записей о процессах решения задачи, например логов информационных систем.

Ситуационная модель представления знаний в составе прецедента. Предлагаемый подход к представлению темпоральных знаний в составе прецедента базируется на общей последовательности их получения и использования. Поэтому можно выделить базовую цепочку изменения, адаптации, приобретения таких знаний:

- получение знаний о текущем состоянии предметной области;
- адаптация знаний о возможных действиях, направленных на изменение состояния подмножества объектов предметной области;
- выбор действий в текущем состоянии предметной области с учетом заданного априорно критерия эффективности;
- реализация действий, которая приводит к изменению состояния подмножества объектов в предметной области;
- получение знаний о новом состоянии предметной области.

В данном случае можно выделить три типа операций по получению и использованию темпоральных знаний:

- получение информации о предметной области;
- преобразование информации в знания;
- формирование действий на основе знаний о новом состоянии.

Указанный набор операций позволяет отразить текущую ситуацию в предметной области на основе ситуационного исчисления [6]. Действительно, информация о предметной области отражает значение набора ее текущих переменных. Полученные на основе информации знания связывают текущее состояние с предварительно выполненными действиями. Набор новых действий позволяет создать новую ситуацию в предметной области. Такой набор реализуется только при наличии заданного состояния предметной области – т. е. заданной ситуации. Иными словами, выполнение последовательности действий по переходу в новую ситуацию осуществляется только при выполнении набора ограничений, задающего необходимое состояние предметной области. Реализация действий по изменению состояния предметной области позволяют выработать новые знания.

Таким образом, все изменения в предметной области могут быть рассмотрены как результат выполненных ранее действий и отражать текущую ситуацию $s_i, i = \overline{1, I}$. При таком рассмотрении целесообразно не использовать явное представление времени, например в виде последовательности моментов

t_k , а описывать ситуации, а также отдельные действия, либо их последовательности, приведшие к указанным ситуациям. Действия, вызывающие переход между ситуациями могут быть представлены логическими терминами.

Исходное состояние предметной области формализуется в виде начальной ситуации s_0 . Особенность начальной ситуации состоит в том, что она отражает состояние предметной области до начала выполнения хотя бы одного действия.

Следовательно, основная особенность ситуационного представления темпоральных знаний заключается в том, что поведение совокупности взаимодействующих объектов предметной области описывается через множество сменяющих друг друга ситуаций. Переход между ситуациями осуществляется по мере выполнения действий над соответствующими объектами.

Исходя из изложенных особенностей получения и использования темпоральных знаний, в рамках предлагаемого ситуационного подхода к представлению таких знаний необходимо определить:

- знания о доступности ситуаций;
- знания об ограничениях на выполнение ситуаций;
- порядок перехода между ситуациями;
- структуру ситуации, которая обеспечивала бы возможность формализации знаний на основе логов с использованием методов интеллектуального анализа процессов.

Обозначим через K предикат, формализующий доступность ситуаций как элементов единого ситуационного представления темпоральных знаний.

Доступность ситуации s_i из начальной ситуации определяется на основе истинности ограничений для текущей ситуации:

$$(\forall s_i) K(s_i, s_0) \supset C_i, \quad (1)$$

где s_i – ситуация, для которой определяется доступность; s_0 – начальная ситуация; C_i – ограничения для ситуации.

Текущее состояние в ситуации s_i может быть представлено на основе значений переменных x_k и отношений между ними в виде формул f_j . Тогда утверждение, что формула f_j истинна в ситуации s_i означает истинность знаний о данной ситуации в некоторый момент времени:

$$s_i \models f_j \Leftrightarrow \exists t_k : f_j = true, \quad (2)$$

где t_k – момент времени, в который f_j истинна в ситуации s_i .

Истинность формулы в соответствии с предлагаемым подходом является результатом выполнения связанного с ситуацией набора действий A_i .

Связанные с ситуаций действия выполняются только при наличии соответствующих условий. Эти условия могут быть представлены в формате набора

ограничений C_i для каждой ситуации s_i . Тогда возможность выполнения связанных с ситуацией действий A_i определяется истинностью логической формулы на основе текущего состояния, выраженного вектором текущих переменных:

$$C_i = f(\overline{X}, s_i) = true \Rightarrow Poss(A_i, s_i), \quad (3)$$

где предикат $Poss$ будет истинным в том случае, если существует возможность выполнить связанные с ситуацией действия A_i .

Условием перехода от ситуации s_{i-1} к ситуации s_i является только такое изменение вектора переменных состояния $\overline{x_{i-1}}$ в ситуации s_{i-1} , при котором будут удовлетворены ограничения C_i для ситуации s_i :

$$\exists \{x_{i-1}\} \subseteq X: C_i = f(\{x_{i-1}\}, s_i) = true. \quad (4)$$

Указанное изменение состояния является результатом выполнения комплексных действий (процедуры, подпроцесса). Для его обозначения адаптируем принятый в ситуационном исчислении предикат $Do(A_i, \{x_{i-1}\}, s_i)$. В данной интерпретации этот предикат принимает истинное значение в том случае, если из исходного состояния, описываемого набором переменных $\{x_{i-1}\}$ удастся достичь требуемого состояния в ситуации s_i , в результате выполнения паттерна, включающего действия A_i .

Необходимые условия истинности данного предиката включают в себя:

- возможность начала выполнения паттерна действий A_i в состоянии предметной области, описываемым набором переменных $\{x_{i-1}\}$; иными словами, значения переменных должны удовлетворять ограничению (2);
- возможность завершения паттерна, включающего действия A_i в ситуации s_i .

Тогда переход между ситуациями представляется в виде (5):

$$\begin{aligned} Do(A_i, s_{i-1}, s_i) = \\ (\forall a_{ik} \in A_i Poss(A_i, s_i) = true) \wedge \\ (Do(A_i, \{x_{i-1}\}, s_i) = true) \end{aligned} \quad (5)$$

Приведенная адаптация предиката перехода между ситуациями позволяет реализовать такой переход в виде транзакции, объединив элементарные действия в единую группу.

Действия, связанные с ситуацией, реализуют некоторый алгоритм, позволяющий достичь требуемого состояния предметной области. Поэтому в целом при переходе между ситуациями могут использоваться более сложные наборы операций: последовательность, ветвление, цикл, параллельное выполнение.

Таким образом, представление ситуационное представление темпоральных знаний в составе прецедента включает в себя: логическое описание состояния ситуации; набор интегральных действий, реали-

зующих отдельные подпроцессы и отображаемых в транзакционной форме; ограничения для ситуации.

Данная модель используется в рамках ситуационного подхода к представлению и моделированию темпоральных знаний. Предлагаемый подход обладает следующими особенностями.

Знания об изменяющихся во времени процессах, явлениях, объектах представляются в форме набора ситуаций. С каждой ситуацией связан определенный алгоритм действий. Реализация этого алгоритма изменяет состояние предметной области и, собственно, создает требуемое состояние ситуации. Знания о последовательности действий представляются в виде предиката $f(A_i)$. Истинность данного предиката свидетельствует о выполнении алгоритма действий и достижении желаемого состояния в конкретной ситуации. Алгоритм может быть выполнен полностью, что приводит к переходу к новой ситуации, либо не выполнен вообще. Частичное выполнение алгоритма означает, что переход к новой ситуации не выполнен и потому рассматривается так же, как и его невыполнение.

Для выполнения связанного с ситуацией набора действий и достижения требуемого состояния необходимо, чтобы текущее состояние удовлетворяло заданным ограничениям C_i . Указанные ограничения представляются в виде предиката, аргументами которого являются переменные, отражающие текущее состояние предметной области. Значения данных переменных, за исключением начальной ситуации s_0 изменяются в результате выполнения наборов действий, связанных с предшествующими ситуациями.

Представление набора действий в форме транзакции позволяет не описывать промежуточные действия, которые существенно не изменяют состояние предметной области (frame problem). Это особенно важно при решении задач интеллектуального анализа процессов, ведь построение процессных моделей основано на анализе событий, отражающих результаты выполнения последовательности действий. Поэтому в такой трактовке все действия изменяют состояние предметной области.

Выводы. Усовершенствована ситуационная модель представления знаний в составе прецедента. Модель отличается от существующих реализацией перехода между ситуациями в форме транзакции, состоящей из последовательности действий, отражающих предопределенную последовательность изменения состояний предметной области. В практическом аспекте выделение транзакций позволяет выделить только те состояния предметной области, которые являются существенными для построения процесса решения задачи в составе прецедента и затем организовать логический вывод на ситуациях.

Предложен ситуационный подход к представлению и моделированию темпоральных знаний, основанный на использовании ситуации с учетом связанных с ней ограничений, а также моделировании перехода между ситуациями в форме транзакций. Подход создает условия для описания решения задачи в

составе прецедента на нескольких уровнях детализации.

7. Kowalski R. A. A logic-based calculus of events/ R. A. Kowalski, M. J. Sergot // *New Generation Computing*. – № 4(1). – 1986. – P. 67–95.

Список литературы

1. Kolodner J. L. *Case-Based Reasoning*/ J. L. Kolodner // San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993. – 668 p.
2. Varshavskii P. R. Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems / P. R. Varshavskii, A. P. Eremeev // *Scientific and Technical Information Processing*. Vol. 37, 2010 – P. 336–345.
3. Allen J. F. Towards a general theory of action and time/ J. F. Allen // *Artificial Intelligence*. – № 23 (2). – 1984. – P. 123–154.
4. Alur R. Real-time logics: complexity and expressiveness / R. Alur, T. A. Henzinger// *Information and Computation*. – № 104(1). – 1993. – P. 35 – 77.
5. Emerson E. A. Temporal Modal Logic / E. A. Emerson// *Handbook of Theoretical Computer Science*, 1990. – P. 997–1071.
6. Reiter R. *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems*./ R. Reiter // The MIT Press, 2001. – 401 p.

References (transliterated)

1. Kolodner J. L. *Case-Based Reasoning*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publ., 1993. 668 p.
2. Varshavskii P. R. Modeling of case-based reasoning in intelligent decision support systems. *Scientific and Technical Information Processing*. 2010, no. 37, pp. 336–345.
3. Allen J. F. Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*. no. 1984, 23 (2), pp. 123–154.
4. Alur R. Real-time logics: complexity and expressiveness. *Information and Computation*. 1993, no. 104 (1), pp. 35–77.
5. Emerson E. A. Temporal Modal Logic. *Handbook of Theoretical Computer Science*, 1990. pp. 997–1071.
6. Reiter R. *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems*. The MIT Press, 2001. 401 p.
7. Kowalski R. A. A logic-based calculus of events. *New Generation Computing*. 1986, no. 4 (1), pp. 67–95.

Поступила (received) 21.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ситуаційний підхід до представлення темпоральних знань прецедентів / С. Ф. Чалый, І. Б. Прибыльнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 70–73. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Ситуационный подход к представлению темпоральных знаний прецедентов / С. Ф. Чалый, И. Б. Прибыльнова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 70–73. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Situational approach to the representation of temporal knowledge of precedents / S. F. Chaly, I. B. Pribylnova // *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 70–73. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалый Сергей Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Прибыльнова Инна Борисівна – доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-90; e-mail: inna.butsukina@nure.ua.

Чалый Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных управляющих систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Прибыльнова Инна Борисовна – доцент кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-90; e-mail: inna.butsukina@nure.ua.

Chalyi Serhii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Control Systems of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-51; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua.

Pribylnova Inna – Associate Professor of the Department of Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-90; e-mail: inna.butsukina@nure.ua.

С. Ю. ШАБАНОВ, Ю.С. НОВИКОВ

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ СЛОЖНОГО СТРУКТУРИРУЕМОГО ОБЪЕКТА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ

В роботі представлено постановку задачі діагностування складного структурованого об'єкта з використанням моделей. Дана задача полягає в отриманні діагнозу несправностей шляхом порівняння структурного, поведінкового опису структурованого об'єкта з його реальною поведінкою з урахуванням загальних знань про предметну область. Запропоновано представлення знань складного структурованого об'єкта у вигляді композиції включених в нього об'єктів, що формалізуються за допомогою патернів, які відображають їх структуру і поведінку. Це дозволяє виконати діагностику об'єкта незалежно від специфіки предметної області, на основі структури і поведінки його складових. Отримані в результаті діагностики залежності можуть відображати зв'язки між невірними елементами і некоректною поведінкою як виду «один-до-одного», так і виду «множина-до-множини».

Ключові слова: структурований об'єкт, діагностування з використанням моделей, діагноз, представлення знань.

В работе представлена постановка задачи диагностирования сложного структурируемого объекта с использованием моделей. Данная задача заключается в получении диагноза неисправностей путем сравнения структурного, поведенческого описания структурируемого объекта с его наблюдаемым поведением с учетом общих знаний о предметной области. Предложено представление знаний сложного составного объекта, при котором объект представляется в виде композиции включенных в него объектов, формализуемых посредством паттернов, отражающих их структуру и поведение. Это позволяет выполнить диагностику объекта независимо от специфики предметной области, на основе структуры и поведения объекта и его составляющих. Полученные в результате диагностики отношения могут отражать связи между неверными элементами и некорректным поведением как вида «один-к-одному», так и вида «множество-ко-множеству».

Ключевые слова: структурируемый объект, диагностирование с использованием моделей, диагноз, представления знаний.

The paper presents a formulation of the problem of diagnosing a structured complex object using models. This objective is to obtain a diagnosis of faults by comparing the structural, behavioral description of a structured object with its observed behavior with regard to the general knowledge of the subject area. A representation of knowledge of complex composite object when the object is represented as a composition of objects included therein, formalized by means of patterns that reflect their structure and behavior. This makes it possible to diagnose the object, regardless of the specifics of the subject area, based on the structure and behavior of an object and its components. The resulting diagnostic relationships may reflect the link between incorrect elements and annoying behavior as a type of "one-to-one" and type "a set-to-set".

Keywords: structured object, model based diagnosis, diagnosis, knowledge representation.

Введение. Диагностика на основе моделей (Model Based Diagnosis, MBD) представляет собой область искусственного интеллекта, которая посвящена определению причин сбоев в поведении диагностируемого объекта или системы. При диагностировании используются два основных подхода: на основе анализа поведения диагностируемого объекта или системы; путем анализа поведения модели диагностируемого объекта или системы [1].

В первом случае в качестве входных данных используется набор симптомов отказов, которые характеризуют рассогласование между наблюдаемым и ожидаемым поведением.

Во втором случае в качестве входных данных используется описание правильного поведения системы и (или) логических взаимосвязей между сбоями и их симптомами.

Результатом решения задачи диагностирования является перечень возможных неисправностей.

Одна из ключевых проблем, затрудняющих использование MBD, связана со сложностью представления знаний о комплексных объектах, и, как следствие, значительных затратах на их диагностику. Такие составные организационные объекты обычно создают среду для решения прикладных задач. В качестве примеров организационных объектов можно привести поликлиники, банки, государственные учреждения, а технических – водопроводные, электрические, газовые сети, различные комплексные устройства.

Таким образом, рассматриваемая в статье проблема представления знаний о сложных структуриру-

емых объектах в MBD задачах является актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2, 3] показано, что решение проблемы диагностики на основе моделей основывается на формировании адекватной парадигмы для построения представления знаний.

Указанная парадигма включает в себя абстракции структуры, отражающие статические аспекты составного объекта и абстракции поведения, выражающие изменения состояния и структуры объекта [4].

Структурная абстракция задает взаимосвязи между компонентами сложного объекта, позволяя описать последний в виде единой системы [5].

Поведенческая абстракция позволяет определить поведение сложного объекта на различных уровнях детализации, в качественном и количественном аспектах [6].

В основе диагностики на основе моделей лежит принцип абстрагирования от специфики предметной области. Это означает, что для построения модели составного объекта необходимо использовать типовые структурные или поведенческие схемы. Знания о таких схемах выражаются в виде шаблонов или паттернов. Модель объединяет эти шаблоны в единую систему.

Поэтому при дальнейшем изложении паттерны структуры и поведения будут формировать как модель объекта, так и модели ее элементов.

Как показано в работе [2], при построении как поведенческой, так и структурной абстракции сложных объектов целесообразно использовать иерархиче-

ские модели. Следовательно, модель составного объекта должна предусматривать детализацию/объединение паттернов на различных уровнях иерархии.

Целью данной статьи является разработка такого представления знаний сложного структурируемого объекта, которое можно было бы использовать в задачах диагностирования с использованием моделей.

Представление знаний сложного структурируемого объекта. Предлагаемый подход к представлению знаний в задаче диагностики составных структурируемых объектов основывается на использовании многоуровневой системы абстракций, а также реализации подхода к диагностированию путем проверки непротиворечивости модели сложной системы.

Комбинация двух указанных подходов позволяет представить знания о сложных составных объектах в виде следующего множества:

$$K_{SO} = \{M_{SO}, P_{OB}, P_G\}, \quad (1)$$

где M_{SO} – модель структурируемого объекта, включающая его компоненты, структуру, поведение; $P_{OB} = \{P_{OB}\}$ – наблюдаемое поведение структурируемого объекта, отображаемое в виде набора структурных шаблонов P_{OB} ; P_G – общие знания о предметной области, в которой функционирует объект.

Формально шаблоны можно представить последовательностями бинарных предикатов R_n , где каждый предикат описывает условие перехода от одного события к другому, т. е. предикаты вычисляются один за другим, в соответствии с порядком в последовательностях, описывая поведение структурируемого объекта:

$$P_{OB} = \begin{cases} R_1(x_1, x_2), \\ R_2(x_2, x_3), \\ \dots \\ R_n(x_n, x_{n+1}). \end{cases} \quad (2)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – структурные элементы составного объекта.

Модель структурируемого объекта представляется следующим образом:

$$M_{SO} = \{P_{CD}, P_{BD}, P_{OC}\}, \quad (3)$$

где $P_{CD} = \{P_{CD}\}$ – множество паттернов P_{CD} , описывающих структуру составного объекта.

Каждый такой паттерн формализуется множеством бинарных предикатов, связывающих элементы $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ структуры составного объекта, т. е. реляционной сетью:

$$P_{CD} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}, \quad (4)$$

где $P_{BD} = \{P_{BD}\}$ – описание поведения составного объекта в виде множества взаимосвязанных паттернов P_{BD} .

Каждый такой паттерн P_{BD} представляет собой последовательность некоторых событий, означающих прохождение элементов составного объекта:

$$P_{BD} = (R_1, R_2, \dots, R_r), \\ \{R_1, R_2, \dots, R_r\} \subseteq \{R_1, R_2, \dots, R_m\}, \quad (5)$$

где $P_{OC} = \{P_{OC}\}$ – набор компонентов структурируемого объекта.

Каждый из компонентов представляется в виде структурного паттерна P_{OC} .

$$P_{OC} = \{x_1, x_2, \dots, x_q\}, \\ \{x_1, x_2, \dots, x_q\} \subseteq \{x_1, x_2, \dots, x_p\}. \quad (6)$$

При решении задачи диагностирования в общем случае необходимо найти ответ на вопрос: почему поведение корректно определенной системы не соответствует исходным требованиям. Для этого необходимо сформировать диагноз неисправностей.

Под диагнозом неисправностей D будем понимать набор зависимостей, отражающих связи между неисправными компонентами и некорректным поведением исследуемого объекта:

$$D = \{P_{OC}^b R P_{OB}^b\}, P_{OC}^b \subset P_{OC}, \quad (7)$$

где P_{OC}^b – подмножество неисправных компонент структурируемого объекта, $P_{OC}^b \subset P_{OC}$; P_{OB}^b – подмножество паттернов, отражающих наблюдаемое некорректное поведение исследуемого объекта, $P_{OB}^b \subset P_{OB}$; R – зависимости, которые отражают влияние неисправных составляющих на неверное поведение объекта.

Формально говоря, необходимо найти логический оператор:

$$F(\{\{x_1, x_2, \dots, x_q\}_i^b\}, \\ \{(R_1, R_2, \dots, R_m)_i^b\}) = 1. \quad (8)$$

Для более формального определения MBD – задачи применительно к структурируемым объектам используем описание знаний о предметной области, представленное выражениями (1) и (3).

Тогда задача диагностики составных структурируемых объектов на основе моделей в целом заключается в получении диагноза неисправностей D путем сравнения структурного, поведенческого описания M_{SO} структурируемого объекта с его наблюдаемым поведением P_{OB} с учетом общих знаний о предметной области P_G , которые влияют на указанное поведение:

$$F(\{\{x_1, x_2, \dots, x_q\}_i^b\}, \\ \{(R_1, R_2, \dots, R_m)_i^b\}, \{R_1^O, R_2^O, \dots, R_k^O\}) = 1. \quad (9)$$

В данной работе основное внимание уделяется непротиворечивости модели структурируемого объекта, поэтому MBD – задача формулируется в следующем виде.

Дано: модель структурируемого объекта M_{SO} , отражающая его структуру и поведение посредством набора паттернов, связывающие его составляющие

(структура), а также изменение состояния (поведение); описание поведения объекта P_{OB} , которое содержит как корректные (соответствующие модели M_{SO}), так и некорректные последовательности событий; указанные последовательности событий отражают изменение состояния объекта; общие знания о предметной области P_G , в которой размещается объект, представленные в виде набора шаблонных зависимостей $\{P_G\}$.

Необходимо получить: набор P_{OC}^b подмножеств элементов $\{P_{OC}^b\}$ с противоречивым поведением: т. е. сами элементы работают корректно, но их совместная работа приводит к некорректному поведению составного объекта в целом:

$$P_{OC}^b = \{P_{OC}^b \mid \forall P_{CD} \exists P_{OB}^b\},$$

где P_{OB}^b – паттерны поведения исследуемого объекта; P_{CD} – структурное описание объекта; $\{P_{OC}^b\}$ – элементы с противоречивым поведением.

Компоненты модели структурируемого объекта P_{OC} представляются в виде паттернов поведения P_{CS} и структурных паттернов P_{CB} :

$$P_{OC} = \{P_{CS}, P_{CB}\}. \quad (11)$$

Поэтому в отличие от существующих подходов к диагностике на основе поведения, проверка непротиворечивости поведения элементов основана на сопоставлении структурного и поведенческого описания сложного объекта.

Необходимое условие для диагностики объектов – наличие формального описания поведения P_{OC} и составляющих его компонент. Для моделирования необходимо формализовать поведение составляющих объекта для различных значений входных сигналов. Иными словами, для проведения диагностики на основе модели объекта не требуется учитывать тип объекта, его функциональные возможности.

Данный подход позволяет представить модель составного объекта в виде композиции составляющих его объектов:

$$\begin{aligned} & \{ \{P_{CD}\}_{i=1}^m, \forall P_{CD}^i \exists \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_p^i\}, \\ & \{P_{BD}\}_{j=1}^n, \forall P_{BD}^j \exists \{y_1^j, y_2^j, \dots, y_q^j\}, \\ & \{P_{OC}^k\}_{k=1}^o, \forall P_{OC}^k \exists \{z_1^k, z_2^k, \dots, z_r^k\} \}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_p^i\}$ – входные сигналы паттернов P_{CD}^i , описывающих структуру составного объекта; $\{y_1^j, y_2^j, \dots, y_q^j\}$ – входные сигналы паттернов P_{BD}^j , описывающих поведение составного объекта; $\{z_1^k, z_2^k, \dots, z_r^k\}$ – входные сигналы неисправных компонент P_{OC}^k .

Таким образом, в соответствии с приведенной выше постановкой задачи, представление знаний о составном структурируемом объекте выполняется на основе следующих положений.

1. Составной объект $\langle P_{CD}, P_{BD} \rangle$ представляется в виде композиции включенных в него объектов, формализуемых посредством паттернов, отражающих их структуру и поведение. Паттерны могут быть реализованы в виде выражений логики первого порядка, процессной алгебры, предикатов. В данной работе паттерны структуры (4) и поведения (2) представляются предикатами АКП:

$$\begin{aligned} & \langle P_{CD}, P_{BD} \rangle = \\ & \langle (R_1, R_2, \dots, R_n)_{i=1}^k, \{R_1, R_2, \dots, R_m\}_{j=1}^l \rangle. \end{aligned} \quad (12)$$

2. Диагностика объекта выполняется независимо от специфики предметной области, на основе структуры и поведения объекта и его составляющих:

$$\begin{aligned} & G((R_1, R_2, \dots, R_n)_{i=1}^k, \\ & \{R_1, R_2, \dots, R_m\}_{j=1}^l) = 1. \end{aligned} \quad (13)$$

3. Полученные в результате диагностики отношения $R_i \in R$ согласно (7) могут отражать связи между неверными элементами и некорректным поведением как вида «один-к-одному»:

$$P(P_{CD}^i(R_i), P_{BD}^j(R_j)) = 1, \quad (14)$$

так и вида «множество-ко-множеству»:

$$P^*(P_{CD}^i(R_1, \dots, R_i), P_{BD}^j(R_1, \dots, R_j)) = 1, \quad (15)$$

где P, P^* – предикатные операции.

4. В отличие от существующих подходов, диагностика объекта, представленного структурными паттернами и паттернами поведения может выполняться в режимах off-line и on-line.

В первом режиме определяются необходимые условия для получения диагноза D . Такие условия определяют связи между структурными паттернами и недопустимым поведением объекта. Иными словами, в режиме off-line выявляются такие противоречивые структурные шаблоны в составе исследуемого объекта, которые могут привести к его некорректному наблюдаемому поведению.

Второй режим является традиционным для диагностики на основе моделей. В данном режиме выявляются достаточные условия некорректного поведения исследуемого комплексного объекта. Иными словами, в режиме on-line выявляются такие поведенческие шаблоны как объекта, так и его составляющих, которые приводят к его некорректному наблюдаемому поведению.

Выводы. Представлена постановка задачи диагностирования с использованием моделей сложного структурируемого объекта. Показано, что данная задача заключается в получении диагноза неисправностей путем сравнения структурного, поведенческого описания структурируемого объекта с его наблюдаемым поведением с учетом общих знаний о предметной области, которые влияют на указанное поведение.

Предложено представление знаний сложного составного объекта, при котором объект представляется

в виде композиции включенных в него объектов, формализуемых посредством паттернов, отражающих их структуру и поведение. Это позволяет выполнить диагностику объекта независимо от специфики предметной области, на основе структуры и поведения объекта в целом, а также его составляющих.

Список литературы

1. De Kleer J. Fundamentals of model-based diagnosis / J. De Kleer, J. Kurien // Palo Alto Research Center, 2003. – <https://www.researchgate.net/publication/228781842>.
2. De Kleer J. Characterizing diagnoses and systems/ J. De Kleer, A. K. Mackworth, R. Reiter// Artificial Intelligence, 1992. – № 56. – P. 197–222.
3. Console L. A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis/ L. Console, P. Torasso // Computational Intelligence, 1991. – №7(3). – P. 133-141.
4. Mozetič I. Model-based diagnosis: An overview. Part 7: Qualitative Reasoning /Mozetič I. // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 617. – 2005. – P. 419-430.
5. Provan G. A General Characterization of Model-Based Diagnosis/ G. Provan// Ebook, Series Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. – 2016. – Vol. 285. – P. 1565 - 1566.
6. Beschta A. A model-based approach to fault localization in power transmission networks/ A. Beschta, O. Dressler, H. Freitag,

M. Montag, P. Struss// Intelligent Systems Engineering, 1993. – № 2 – P. 3–14.

References (transliterated)

1. De Kleer J. Fundamentals of model-based diagnosis/ J. De Kleer, J. Kurien // Palo Alto Research Center, 2003. – <https://www.researchgate.net/publication/228781842>.
2. De Kleer J. Characterizing diagnoses and systems/ J. De Kleer, A. K. Mackworth, R. Reiter// Artificial Intelligence, 1992. no. 56, pp. 197–222.
3. Console L. A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis/ L. Console, P. Torasso // Computational Intelligence, 1991. no. 7(3), pp. 133-141.
4. Mozetič I. Model-based diagnosis: An overview. Part 7: Qualitative Reasoning /Mozetič I. // Lecture Notes in Computer Science, no. 617. 2005, pp. 419-430.
5. Provan G. A General Characterization of Model-Based Diagnosis/ G. Provan//, Ebook, Series Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2016. no. 285, pp. 1565 - 1566.
6. Beschta A. A model-based approach to fault localization in power transmission networks/ A. Beschta, O. Dressler, H. Freitag, M. Montag, P. Struss// Intelligent Systems Engineering, 1993. no. 2, pp. 3–14.

Поступила (received) 21.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Подання знань складного структурованого об'єкта в задачах діагностування з використанням моделей / С. Ю. Шабанов, Ю. С. Новіков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 74–77. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Представление знаний сложного структурируемого объекта в задачах диагностирования с использованием моделей / С. Ю. Шабанов, Ю. С. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 74–77. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Presentation of a structured knowledge of a complex object in diagnosing problems with the use of models / S. Y. Shabanov, Y. S. Novikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 74–77. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шабанов-Кушнарченко Сергій Юрійович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник кафедри програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-46; e-mail: sergei.shabanov-kushnarenko@nure.ua.

Новіков Юрій Сергійович – старший викладач кафедри програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, тел.: (057) 702-14-46; e-mail: yuriy.novikov@nure.ua.

Шабанов-Кушнарченко Сергей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры программной инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-46; e-mail: sergei.shabanov-kushnarenko@nure.ua.

Новиков Юрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры программной инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, тел.: (057) 702-14-46; e-mail: yuriy.novikov@nure.ua.

Shabanov-Kushnarenko Sergey – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading researcher of the Department of Software Engineering of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-46; e-mail: sergei.shabanov-kushnarenko@nure.ua.

Novikov Yuriy – Senior lecturer at the program engineering department of the Kharkiv National University of Radioelectronics, c. Kharkiv, (057) 702-14-46; e-mail: yuriy.novikov@nure.ua.

В. М. ЛЕВЫКИН, И. А. ЮРЬЕВ**МОДЕЛЬ ВЫБОРА НАБОРА ИТ-СЕРВИСОВ ДЛЯ КОНЕЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

У статті розглядаються питання вибору набору ІТ-сервісів для кінцевих користувачів інформаційної системи. Розроблено модель вибору набору ІТ-сервісів для кінцевих користувачів. Описано всі елементи розробленої моделі та їх взаємодія в процесі вибору набору ІТ-сервісів. Представлена ієрархічна структура критеріїв оцінки ІТ-сервісу. Представлена реалізація розробленої моделі з застосуванням методу парних порівнянь.

Ключові слова: ІТ-сервіс, вибір, інформаційна система, кінцеві користувачі.

В статье рассматриваются вопросы выбора набора ИТ-сервисов для конечных пользователей информационной системы. Разработана модель выбора набора ИТ-сервисов для конечных пользователей. Описаны все элементы разработанной модели и их взаимодействие в процессе выбора набора ИТ-сервисов. Представлена иерархическая структура критериев оценки ИТ-сервиса. Представлена реализация разработанной модели с применением метода парных сравнений.

Ключевые слова: ИТ-сервис, выбор, информационная система, конечные пользователи.

The article deals with the selection of a set of IT services for end-users of information systems. The model of selecting a set of IT services to end users was developed. All the elements of the developed model was describe, and their interaction in the process of selecting a set of IT services. A set of high-quality IT services means their best set of features and characteristics that meet the stated needs of the enterprise. Enterprise requirements are determined by its business strategy. IT services is a set of software, which has the same functionality corresponds to a plurality of end user requirements. This set is determined by the requirements of end-users to support business processes, which are performed as part of their job descriptions. A paper presents a hierarchical structure of criteria for evaluating IT service. Presents the implementation of the developed model using the method of paired comparisons.

Keywords: IT service, selection, information system, end-users.

Введение. В настоящее время растущая зависимость бизнес-процессов от качества и надежности поддерживающей их информационной системы требует системного подхода к управлению ИТ-инфраструктурой предприятия [1]. В качестве одного из вариантов решения можно предложить переход к сервис-ориентированной архитектуре (СОА), которая по своей сути означает, что в ходе разработки (модернизации) информационной системы предприятия следует рассматривать не прикладную информационную систему в целом, а отдельные ее функциональные компоненты – ИТ-сервисы.

В результате применения СОА при разработке информационной системы поддержка необходимых бизнес-процессов может осуществляться различными наборами ИТ-сервисов, что приводит к необходимости разработки модели позволяющей произвести выбор набора ИТ-сервисов в условиях СОА [2].

Проведенные исследования показали, что процесс определения необходимого набора ИТ-сервисов сводится к решению задачи формирования набора ИТ-сервисов по заданным критериям в зависимости от функционального назначения информационной систем. Кроме этого в процесс разработки такой композиции необходимо учитывать предпочтения конечных пользователей ИТ-сервисов, и фиксировать причины и последствия установления тех или иных предпочтений [2].

Разработка модели выбора набора ИТ-сервисов. Вместе с тем на выбор набора ИТ-сервисов, необходимого для поддержки бизнес-процессов, существенное влияние оказывают неопределенности, которые могут быть вызваны:

1. Недостатком или отсутствием информации, об альтернативных вариантах (существующих ИТ-сервисах);

2. Невозможностью проведения большого количества исследований и оценок характеристик ИС, в связи с высокой стоимостью таких исследований;
3. Кардинально противоположными мнениями экспертов при оценке тех или иных параметров рассматриваемых ИТ-сервисов.

В связи с этим модель выбора набора ИТ-сервисов в рамках СОА для ИС представлена в виде кортежа:

$$M_V = \langle X, Y, Z, U, W, G, P, R, K \rangle, \quad (1)$$

где $X = \{x_i\}, i=1, 2, \dots, n$ – множество бизнес-процессов, выбранных в рамках стратегии предприятия для автоматизации с использованием ИС; $Y = \{y_j\}, j=1, 2, \dots, n$ – множество ИТ-сервисов, предоставляемых различными программными средствами, которые рассматриваются в процессе выбора в качестве альтернатив; $Z = \{z_j\}, j=1, 2, \dots, n$ – множество программного обеспечения реализующего требуемую функциональность для автоматизации и поддержки бизнес-процессов X ; $U = \{u_j\}, j=1, 2, \dots, n$ – множество требований конечных пользователей к требуемому ИТ-сервису; $W = \{w_j\}, 1, 2, \dots, n$ – множество ограничений накладываемых руководством на начальный перечень рассматриваемых программных продуктов Z ; $G = \{g_j\}, 1, 2, \dots, n$ – множество критериев для оценки качества альтернатив при решении задачи выбора сервисов; $P = \{p_j\}, j=1, 2, \dots, n$ – экспертные оценки альтернатив Y для критериев G ; $R = \{r_j\}, j=1, 2, \dots, n$ – набор правил, определяющих принципы сравнения и ранжирования оценок сервисов

Y на основании их оценок P ; K – критерий оптимальности выбора ИТ-сервиса, где $K \in G$ и определяет выбор ИТ-сервисов на основании оценок P с учетом правил R .

Основная задача выбора ИТ-сервисов при использовании СОА состоит в поиске такого набора ИТ-сервисов $Y^* = \{y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jm}\}$, которые обеспечат необходимую поддержку бизнес-процессов $X = \{x_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$, в соответствии с правилами сравнения и выбора альтернатив $R = \{r_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n$ с учетом критерия оптимальности K .

Под качественным набором ИТ-сервисов следует понимать их наилучший набор свойств и характеристик, которые удовлетворяют заявленным потребностям предприятия (бизнес-функциям).

За основу множество критериев G предлагается использовать структуру критериев оценки качества информационных систем в соответствии с ГОСТ 9126-93 [3], в котором оценка информационной системы производится на основании шести факторов качества: функциональность, надежность, удобство использования, эффективность, сопровождаемость, переносимость. Каждый из этих факторов более подробно определяется при помощи отдельных критериев разного уровня, образующих иерархическую структуру критериев качества. Функциональность определяется следующими показателями: пригодность, правильность, способность к взаимодействию, согласованность, защищенность, простота внедрения. Надежность определяется следующими показателями: стабильность, восстанавливаемость. Практичность определяется следующими показателями: понятность, простота использования. Эффективность определяется следующими показателями: характер изменения во времени, характер изменения ресурсов. Сопровождаемость определяется следующими показателями: анализируемость, изменяемость, устойчивость, тестируемость. Мобильность определяется следующими показателями: адаптируемость, соответствие, взаимозаменяемость. На самом нижнем уровне данной структуры критериев находятся метрики, по которым сравниваются критерии самого нижнего уровня.

Множество ИТ-сервисов $\{Y\}$ представляет собой набор программного обеспечения $\{Z\}$, который по своему функционалу соответствует множеству требований конечных пользователей $\{U\}$. Множество требований $\{U\}$ определяется требованиями конечных пользователей для поддержки бизнес-процессов, которые они выполняют в рамках их должностных инструкций. Множество $\{Y\}$ формируется руководством предприятия совместно с аналитиками ИТ-отдела, которые являются компетентными в вопросах функциональности различного программного обеспечения. Руководство накладывает определенные ограничения $\{W\}$ на множество программного обеспечения $\{Z\}$ и если Z_i удовлетворяет данным ограничениям $\{W\}$, то становится одной из рассматриваемых альтернатив $y_j \in Y$.

Множество оценок $\{P\}$ для множества альтернатив $\{Y\}$ формируется экспертами на основании набора правил $\{R\}$, который представляет собой совокупность знаний, умений, опыта и квалификации экспертов. Поскольку только экспертным путем можно сравнить рассматриваемые альтернативы Y , то необходимо получить соответствующее множество оценок $\{P\}$.

После того как множество оценок $\{P\}$ сформировано, возникает проблема реализации разработанной модели, а именно выбор наилучшего y_j из $\{Y\}$ по критерию K .

Применение метода анализа иерархий для решения задачи выбора набора ИТ-сервисов. В настоящее время существует несколько методов для выбора одной из альтернатив по определенному признаку, и все они используют различные алгоритмы для расчета итоговых оценок. К таковым можно отнести: метод средневзвешенной экспертной оценки, группу методов ELECTRE, метод SMART, метод анализа иерархий, метод оценки относительно нормативов и многие другие [4, 5]. Метод анализа иерархий заключается в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений лица, принимающего решение, по парным сравнениям [4]. В результате может быть выражена относительная степень (интенсивность) взаимодействия элементов в иерархии. Эти суждения затем выражаются численно. Метод анализа иерархий включает процедуры синтеза множественных суждений, получения приоритетности критериев и нахождения альтернативных решений. Реализация метода анализа иерархий включает следующие этапы:

Этап 1. Построение иерархии проблемы.

Этап 2. Построение матрицы парных сравнений.

Этап 3. Расчет собственных векторов и их нормированных оценок по каждой матрице парных сравнений.

Этап 4. Оценка согласованности матриц парных сравнений. В случае если индекс согласованности меньше 10% выполняется этап 5. В случае если индекс согласованности больше 10% необходимо вернуться на этап 2 и скорректировать матрицу парных сравнений.

Этап 5. Расчет итоговых приоритетов.

Построение иерархии проблемы выбора наилучшего ИТ-сервиса реализуется руководством предприятия совместно с ИТ-отделом. Иерархия оценки конкурентоспособности ИТ-сервисов представлена на рис. 1. На этом этапе выбираются группы факторов качества из предложенного перечня в ГОСТ 9126-93. Для выбранных групп факторов качества экспертами формируются матрицы парных сравнений (табл. 1.)

После того как разработана иерархия задачи выбора наилучшего ИТ-сервиса и построены все матрицы парных сравнений на следующем этапе рассчитываются собственные векторы приоритетов (V_i):

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (2)$$

где a_{ij} – j -й элемент в i -й строке матриц парных сравнений; n – размерность матрицы парных сравнений.

В дальнейшем необходимо рассчитать нормированные оценки собственных векторов (N_j):

$$N_j = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (3)$$

где i – индекс строки в матрице парных сравнений.

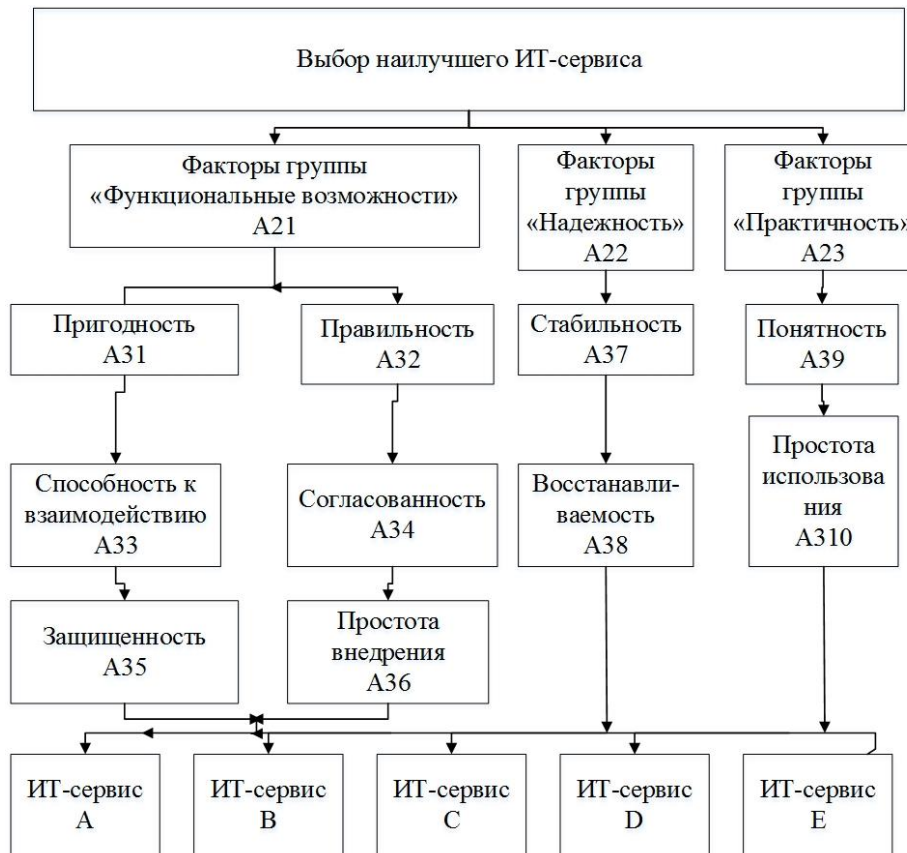


Рис. 1 – Иерархия оценки конкурентоспособности ИТ-сервисов

Однако не всегда оценки экспертов являются правильными, поэтому их необходимо постоянно проверять, для этого используются такие показатели, как индекс согласованности (ИС) и оценка согласованности (ОС). Индекс согласованности рассчитывается по формуле:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (4)$$

где: ИС – индекс согласованности для рассматриваемой матрицы парных сравнений; λ_{\max} – максимальное согласованное значение матрицы.

Максимальным согласованным значением матрицы является сумма согласованных значений по всем столбцам:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \lambda_j, \quad (5)$$

В свою очередь λ_j определяется произведением нормированной оценки j -й строки на сумму j -го элементов столбца:

$$\lambda_j = S_j \cdot N_j, \quad (6)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (7)$$

Для того, чтобы оценить, является ли полученное согласование приемлемым или нет, его сравнивают со случайным индексом (СИ).

Случайный индекс берется из таблицы соотношения между случайной согласованностью и размером матрицы парных сравнений [4].

Оценка согласованности определяется выражением:

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}. \quad (8)$$

Если $ОС < 10\%$, то данные матрицы сравнений, составленной экспертом приемлемы. В противном случае эксперту следует пересмотреть свои суждения и оценки и вновь построить матрицу парных сравнений А. Проверка ОС позволяет отбросить из рассмотрения заведомо нелогичные оценки экспертов.

Ниже представлен пример реализации метода парных сравнений для задачи выбора ИТ-сервиса.

Пример расчетов и анализ полученных результатов. Матрица парных сравнений для групп факторов выбора ИТ-сервиса представлена в табл. 1,

в соответствии с иерархией оценок конкурентно способности ИТ-сервисов (рис. 1).

На следующем этапе необходимо сформировать матрицы парных сравнений для критериев выбранных

групп факторов: «Функциональные возможности (A21)» (табл.2), «Надежность (A22)» (табл.3), «Практичность (A23)» (табл.4.)

Таблица 1 – Матрица парных сравнений для групп факторов выбора ИТ-сервиса

Факторы выбора ИТ-сервиса	A21	A22	A23	V	N
A21	1	3	7	2,759	0,649
A22	1/3	1	5	1,186	0,279
A23	1/7	1/5	1	0,306	0,072
λ_{\max}	3,065				
ИС	3,24 %				
ОС	5,59 %				

Таблица 2 – Матрица парных сравнений для критериев группы факторов «Функциональные возможности (A21)»

Критерии	A31	A32	A33	A34	A35	A36	V	N
A31	1	1/5	1	1/3	1/9	1/9	0,306	0,036
A32	5	1	3	3	1	1/3	1,570	0,186
A33	1	1/3	1	1/3	1/7	1/9	0,348	0,041
A34	3	1/3	3	1	1/3	1/3	0,833	0,099
A35	9	1	7	3	1	1	2,396	0,283
A36	9	3	9	3	1	1	3,000	0,355
λ_{\max}	6,184							
ИС	3,68 %							
ОС	2,97 %							

Таблица 3 – Матрица парных сравнений для критериев группы факторов «Надежность (A22)»

Критерии	A37	A38	V	N
A37	1	2	1,414	0,667
A38	1/2	1	0,707	0,333
λ_{\max}	2			
ИС			0,00 %	
ОС			0,00 %	

Таблица 4 – Матрица парных сравнений для критериев группы факторов «Практичность (A23)»

Критерии	A39	A310	V	N
A39	1	5	2,236	0,833
A310	1/5	1	0,447	0,167
λ_{\max}	2			
ИС			0,00 %	
ОС			0,00 %	

На следующем этапе необходимо сформировать матрицу парных сравнений ИТ-сервисов по каждому критерию каждой группы факторов. В качестве примера приведем матрицы для критериев «Защищенность (A35)» (табл. 5) и «Простота внедрения (A36)»

(табл. 6). Результаты расчета всех векторов приоритетов для группы факторов «Функциональные возможности» представлены в табл. 7, для группы факторов «Надежность» – в табл. 8, для группы факторов «Практичность» – в табл. 9.

Таблица 5 – Матрица парных сравнений ИТ-сервисов по критерию «Защищенность (A35)»

Сервисы	ИТ-сервис А	ИТ-сервис В	ИТ-сервис С	ИТ-сервис D	ИТ-сервис Е	V	N
ИТ-сервис А	1	3	3	4	1/5	1,484	0,201
ИТ-сервис В	1/3	1	1	5	1/5	0,803	0,109
ИТ-сервис С	1/3	1	1	3	1/5	0,725	0,098
ИТ-сервис D	1/4	1/5	1/3	1	1/9	0,284	0,039
ИТ-сервис Е	5	5	5	9	1	4,076	0,553
λ_{\max}	5,313						
ИС	7,83 %						
ОС	6,99 %						

Таблица 6 – Матрица парных сравнений ИТ-сервисов по критерию «Простота внедрения (A36)»

Сервисы	ИТ-сервис А	ИТ-сервис В	ИТ-сервис С	ИТ-сервис D	ИТ-сервис Е	V	N
ИТ-сервис А	1	7	9	1	7	3,380	0,428
ИТ-сервис В	1/7	1	3	1/5	1	0,612	0,078
ИТ-сервис С	1/9	1/3	1	1/7	1/3	0,281	0,036
ИТ-сервис D	1	7	7	1	5	3,005	0,381
ИТ-сервис Е	1/7	1	3	1/5	1	0,612	0,078
λ_{\max}	5,194						
ИС		4,84 %					
ОС		4,32 %					

Таблица 7 – Векторы приоритетов для рассматриваемых ИТ-сервисов по группе факторов «Функциональные возможности»

Сервисы	V – A31	V – A32	V – A33	V – A34	V – A35	V – A36
ИТ-сервис А	0,534	0,479	0,421	0,340	0,201	0,428
ИТ-сервис В	0,074	0,110	0,064	0,340	0,109	0,078
ИТ-сервис С	0,037	0,029	0,033	0,034	0,098	0,036
ИТ-сервис D	0,187	0,265	0,421	0,231	0,039	0,381
ИТ-сервис Е	0,169	0,117	0,061	0,033	0,553	0,078

Таблица 8 – Векторы приоритетов для рассматриваемых ИТ-сервисов по группе факторов «Надежность»

Сервисы	V – A37	V – A38
ИТ-сервис А	0,122	0,298
ИТ-сервис В	0,600	0,298
ИТ-сервис С	0,070	0,045
ИТ-сервис D	0,178	0,239
ИТ-сервис Е	0,029	0,120

Таблица 9 – Векторы приоритетов для рассматриваемых ИТ-сервисов по группе факторов «Практичность»

Сервисы	V – A39	V – A310
ИТ-сервис А	0,238	0,333
ИТ-сервис В	0,238	0,111
ИТ-сервис С	0,048	0,111
ИТ-сервис D	0,238	0,333
ИТ-сервис Е	0,238	0,111

После того как все матрицы парных сравнений разработаны, необходимо определить приоритеты выбора ИТ-сервиса по каждой группе факторов. Для этого объединим векторы приоритетов по каждому из критериев в рамках определенной группы факторов и разместим их по столбцам в той последовательности, в которой размещены сами критерии на схеме иерархии проблемы.

Полученную в результате комбинированную матрицу умножаем на соответствующий вектор приоритета в рамках определенной группы факторов.

Для получения всех векторов приоритета для группы факторов «Функциональные возможности» необходимо значения приоритетов из табл. 7 умножить на нормированную оценку из табл. 2. Результаты расчетов представлены выражением (9):

$$\begin{pmatrix} 0,534 & 0,479 & 0,421 & 0,340 & 0,021 & 0,428 \\ 0,074 & 0,110 & 0,064 & 0,340 & 0,109 & 0,078 \\ 0,037 & 0,029 & 0,033 & 0,034 & 0,098 & 0,038 \\ 0,187 & 0,265 & 0,421 & 0,231 & 0,039 & 0,381 \\ 0,169 & 0,117 & 0,061 & 0,033 & 0,533 & 0,078 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,036 \\ 0,186 \\ 0,041 \\ 0,099 \\ 0,283 \\ 0,355 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,396 \\ 0,171 \\ 0,036 \\ 0,307 \\ 0,090 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Из полученных результатов расчетов видно, что ИТ-сервис А является наилучшим по фактору «Функциональные возможности», так как имеет наивысшее значение.

Для получения всех векторов приоритета для группы факторов «Надежность» необходимо значения приоритетов из табл. 8 умножить на нормированную оценку из табл. 3.

Представленные выражением (10) результаты расчетов могут быть проанализированы с целью оценивания того, какой из факторов является наилучшим по группе факторов «Надежность».

$$\begin{pmatrix} 0,122 \\ 0,600 \\ 0,070 \\ 0,178 \\ 0,029 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,667 \\ 0,333 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,182 \\ 0,499 \\ 0,062 \\ 0,198 \\ 0,059 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Как это видно полученных результатов расчетов, по группе факторов «Надежность» наилучшим является ИТ-сервис В, поскольку он имеет наивысшее значение.

Для получения всех векторов приоритета для группы факторов «Практичность» необходимо значения приоритетов из табл. 9 умножить на нормированную оценку из табл. 4. Результаты расчетов представлены выражением (11):

$$\begin{pmatrix} 0,238 & 0,333 \\ 0,238 & 0,333 \\ 0,048 & 0,111 \\ 0,238 & 0,333 \\ 0,238 & 0,111 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,833 \\ 0,167 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,254 \\ 0,217 \\ 0,059 \\ 0,254 \\ 0,217 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В результате расчетов ИТ-сервисы А и Д являются наилучшими по группе факторов «Надежность», так как они имеют одинаковы наивысшие значения.

Теперь определим общие приоритеты уровня конкурентоспособности по всем группам факторов оценки ИТ-сервисов. Для этого необходимо векторы

приоритетов по всем группам факторов, полученные в расчетах (9)–(11), объединить в матрицу и умножить ее на нормированную оценку из табл. 1. Результаты расчетов представлены выражением (12):

$$\begin{pmatrix} 0,396 & 0,182 & 0,254 \\ 0,171 & 0,499 & 0,217 \\ 0,036 & 0,062 & 0,059 \\ 0,307 & 0,198 & 0,254 \\ 0,090 & 0,059 & 0,217 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,649 \\ 0,279 \\ 0,072 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,326 \\ 0,266 \\ 0,045 \\ 0,273 \\ 0,090 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

В результате всех вычислений получаем следующий результат: наилучшим по всем параметрам оценки является ИТ-сервис А. Чтобы более наглядно увидеть конкурентные преимущества того или иного ИТ-сервиса по всем параметрам, систематизируем то, что было рассчитано ранее, в таблицу конкурентных преимуществ ИТ-сервисов (табл. 10).

Таблица 10 – Конкурентные преимущества рассматриваемых ИТ-сервисов по оцениваемым параметрам качества

Показатели конкурентоспособности	Вектор приоритета выбора ИТ-сервисов				
	ИТ-сервис А	ИТ-сервис В	ИТ-сервис С	ИТ-сервис Д	ИТ-сервис Е
1. Пригодность	0,534	0,074	0,037	0,187	0,169
2. Правильность	0,479	0,110	0,029	0,265	0,117
3. Способность к взаимодействию	0,421	0,064	0,033	0,421	0,061
4. Согласованность	0,340	0,340	0,034	0,213	0,055
5. Защищенность	0,201	0,109	0,098	0,039	0,553
6. Простота внедрения	0,428	0,078	0,036	0,381	0,078
7. Стабильность	0,122	0,600	0,070	0,178	0,029
8. Восстанавливаемость	0,298	0,298	0,045	0,239	0,120
9. Понятность	0,238	0,238	0,048	0,238	0,238
10. Простота использования	0,333	0,111	0,111	0,333	0,111
Общие приоритеты	0,326	0,266	0,045	0,273	0,090

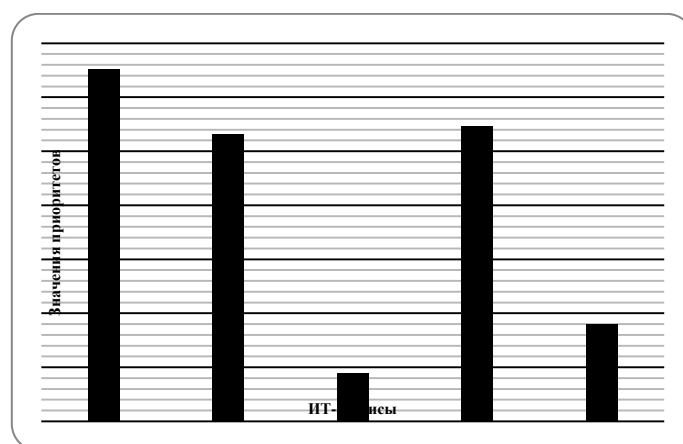


Рис. 2 – Диаграмма конкурентоспособности рассматриваемых ИТ-сервисов

Таким образом, наилучшим является ИТ-сервис А (см. рис. 2), поскольку он достаточно прост в использовании, что является очень важным для руководства предприятия, а также имеет высокие оценки по критериям «Правильность» и «Простота внедрения».

Выводы. Разработана модель выбора набора ИТ-сервисов для конечных пользователей. Модель представляет собой решение задачи выбора набора ИТ-сервисов по заданным критериям в зависимости от функциональных требований конечных пользователей. Показана реализация разработанной модели с

использование метода анализа иерархий на примере выбора ИТ-сервисов по заданным группам факторов.

Список литературы

1. Дик Г. Д. Выбор ИТ-сервисов информационной системы с целью повышения эффективности функционирования транспортной логистической системы / Г. Д. Дик, А. Б. Дегтярев // Изв. СПб. гос. электротехн. ун-та. – СПб : ЛЭТИ. – 2014. – Вып. 5. С. 17–24.
2. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. / Р. Штойер. – М. : Радио и связь, 1992. – 504 с.
3. ГОСТ 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. – М. : Стандартинформ, 2004. – 12 с.
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
5. Лотов, В. А. Многокритериальные задачи принятия управленческих решений / В. А. Лотов, И. И. Пospelova. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 197 с

References (transliterated)

1. Dik G. D., Degtyarev A. B. Vybora IT-servisov informatsionnoy sistemy s tsel'yu povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya transportnoy logisticheskoy sistemy [Selection of IT services information system in order to increase the efficiency of transport logistics system]. *Izv. SPb. gos. elektrotekhn. un-ta.* St. Petersburg, LETI Publ., 2014, vol. 5, pp 17–24.
2. Shtoyer R. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya. Teoriya, vychisleniya i prilozheniya* [Multi-criteria optimization. The theory, computation and applications]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1992. 504 p.
3. *GOST 9126-93. Informatsionnaya tekhnologiya. Otsenka programmnoy produktsii. Kharakteristiki kachestva i rukovodstva po ikh primeneniyu* [State Standard 9126-93–1993. Information technology. Evaluation of software products. Characteristics and quality of their application management]. Moscow, Standartinform Publ., 1993. 12 p.
4. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Making decisions. Analytic Hierarchy Method.]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 278 p.
5. Lotov V. A., Pospelova I. I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya upravlencheskikh resheniy* [Multicriteria task management decision-making]. Moscow, MAKS Press Publ., 2008. 197 p.

Поступила (received) 22.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модель вибору набору ІТ-сервісів для кінцевих користувачів / В. М. Левикін, І. О Юр'єв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 78–84. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Модель выбора набора ИТ-сервисов для конечных пользователей / В. М. Левыкин, И. А. Юрьев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 78–84. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Model selection of the set of IT services for end users / V. M. Levykin, I. A. Iuriev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 78–84. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левикін Віктор Макарович – доктор технічних наук, професор завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; тел.: (057) 702-13-26; email: levikinvictor@gmail.com.

Левыкин Виктор Макарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных управляющих систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; тел.: (057) 702-13-26; email: levikinvictor@gmail.com.

Levykin Viktor Makarovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of information management systems department, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine; tel.: (057) 702-13-26; email: levikinvictor@gmail.com,

Юр'єв Іван Олексійович – аспірант, асистент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; тел. (057) 702-13-26; email: ivan.iuriev@gmail.com.

Юрьев Иван Алексеевич – аспирант, ассистент кафедры информационных управляющих систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; тел.: (057) 702-13-26; email: ivan.iuriev@gmail.com.

Iuriev Ivan Alekseevich – Postgraduate Student, Assistant of information management systems department, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine; tel.: (057) 702-13-26; email: ivan.iuriev@gmail.com.

В. И. АЗАРЕНКОВ

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ЦВЕТА В ПОЛИГРАФИИ

На основі багатовідкликової колірної моделі корекції кольору пропонується оптимізований метод колірної корекції, що дозволяє при підготовці до друку високоякісних кольорових зображень, максимально наближених по відтворенню кольору до оригіналу, врахувати особливості сприйняття колірної яскравості, насиченості і колірного тону зоровою системою і отримати в широкому діапазоні в реальному масштабі часу практично незалежну корекцію по яскравості, насиченості і колірного тону.

Ключові слова: корекція кольору, багатовідкликова колірна модель, управління кольором, колірний профіль.

На основе многооткликковой цветовой модели коррекции цвета предлагается оптимизированный метод цветовой коррекции, позволяющий при подготовке к печати высококачественных цветных изображений, максимально приближенных по воспроизведению цвета к оригиналу, учесть особенности восприятия цветовой яркости, насыщенности и цветового тона зрительной системой и получить в широком диапазоне в реальном масштабе времени практически независимую коррекцию по яркости, насыщенности и цветовому тону.

Ключевые слова: коррекция цвета, многооткликковая цветовая модель, управление цветом, цветовой профиль.

Well-known algorithms and is built on a system of color correction does not allow to achieve a fully independent operational control of various parameters of the color image, wherein the correction is carried out in maintaining white balance, which makes it impossible to use them for the correction of old images and film library, which, along with other color distortion, a shift in white balance. Therefore, important and relevant are the tasks of an analysis of limitations of known systems and color correction methods, research their solutions and develop new methods and devices for color correction, correction of distortion of color in systems of formation, reproduction and analysis of color images. Based on color multiresponse model a color correction method of an optimized color correction, allowing for the printing of high quality color images as close in color reproduction to the original, to take into account features of perception of color brightness, saturation and color tone of the visual system and to in a wide range of real-time correction is practically independent of brightness, saturation, and hue.

Keywords: color correction, color multiresponse model, color management, color profile.

Актуальность. Основная задача, которую решают полиграфические технологии, – это высококачественная печать изображений, максимально приближенных по воспроизведению к оригиналу. Большую группу оригиналов, поступающих в полиграфическое производство, составляют цветные оригиналы – цветные изображения (фотографии, рисунки, слайды, графика, в том числе, и компьютерная). Они играют особую роль в структуре любого издания, особенно в изданиях, несущих кроме информационной и эстетической, также и эмоциональную нагрузку, например, в рекламных или художественных изданиях. Для их репродуцирования необходимо произвести специальные преобразования, обеспечивающие возможность их полиграфического воспроизведения, главными из которых являются цветоделение и растривание (для тоновых оригиналов). Все эти преобразования приводят к искажениям, которые сказываются на градиционных, резкостных, цветовых и других свойствах получаемого в дальнейшем изображения. Кроме того, существует серьезная проблема обеспечения согласованной цветопередачи между различными производящими цвет устройствами и материалами вследствие цветовых искажений, вызванных несовпадением цветовых охватов этих устройств.

Известные алгоритмы и построенные на них системы цветокоррекции не позволяют добиться полностью независимой оперативной регулировки различных параметров цветного изображения; при этом коррекция в них осуществляется с сохранением баланса белого, что не дает возможности использовать их для коррекции старых изображений и киновидеоматериалов на пленках, где наряду с другими цветовыми искажениями наблюдается смещение баланса белого.

Поэтому важной и актуальной представляются

задачи анализа ограничений известных систем и методов цветовой коррекции, исследования способов их устранения и разработки новых методов и устройств цветокоррекции, устранения искажений цветопередачи в системах формирования, воспроизведения и анализа цветных изображений. Особенно остро этот вопрос стоит в системах с повышенным требованием к качеству воспроизведения цвета.

Цель работы. Основной целью работы является разработка новых методов и устройств цветовой коррекции, позволяющих осуществлять оперативную, практически независимую, коррекцию отдельных параметров цвета изображения в реальном масштабе времени в широком диапазоне и с минимальным количеством регулировок.

Существующий подход. Используемые ранее в классической (старой) полиграфии алгоритмы и построенные на них системы цветокоррекции не позволяли добиться полностью аппаратно-независимой регулировки различных параметров цветного изображения. В полиграфии речь идет о комплексе различного оборудования, одной из целей взаимодействия которого является точность цветопередачи. Необходимо так управлять цветом, чтобы, пройдя через все этапы производства, он остался неизменным.

Известно, что каждое устройство воспроизводит цвет по-разному, внося в него свои искажения. Эти устройства можно разбить на три основные группы: ввода, отображения и вывода. К первой группе относятся сканеры и цифровые камеры, т. е. средства, с помощью которых графическая информация поступает в электронную среду обработки. Ко второй группе – мониторы и проекторы, которые являются неотъемлемым атрибутом обработки изображений. Третья группа включает в себя различные принтеры, плоттеры, машины вывода фотоформ и пластин,

полиграфические печатные процессы. Модели цветовоспроизведения данных устройств (в основном RGB, CMYK) являются аппаратно-зависимыми. Без определенных дополнительных преобразований невозможно сохранить один и тот же цвет. Простой пример – RGB устройство никогда не сможет без дополнительных преобразований интерпретировать CMYK данные и наоборот. Более сложный пример – несколько CMYK устройств, принимая одни и те же CMYK сигналы, будут воспроизводить цвет по-разному в силу использования различных технологий и красок разных цветов.

В классических закрытых издательских системах устройства ввода, отображения и вывода представляли собой единое целое. Были необходимы только однократные калибровки (адаптации) устройств друг на друга. Затем цвета по результатам калибровок постоянно пересчитывались, и этим соблюдалось определенное постоянство цветовоспроизведения. Закрытые системы не подразумевали подключения дополнительных устройств и работают только с существующими компонентами, поэтому методика калибровки и настройки по существу являлась задачей производителя, не пользователя.

Для достижения отпечатка требуемого качества приходилось печатать серию цветопроб, по которым оператор печатной машины имел возможность судить, в какую сторону «уходит» цвет, и на основании этого изменять настройки печати для компенсации погрешности. Далее осуществлялась печать следующей цветопробы. Если опять «не попали» в цвет, проводились дальнейшая корректировка настроек печатной машины и вывод следующей цветопробы. Фактически подбор параметров печати осуществлялся вслепую, методом проб и ошибок. Многое определяла квалификация оператора, который на основании собственных знаний, опыта и профессиональной интуиции мог справиться с этой задачей с меньшими затратами времени и усилий. Одновременно была возможность осуществлять приблизительную настройку печати, поскольку во многих случаях, зная особенности воспроизведения изображения данным устройством и материалом, цветовые искажения, вносимые устройством либо материалом, можно было предсказать. Известным представителем такого подхода является Дэн Маргулис, сумевший первым изложить [1] теорию и опыт подобного метода цветокоррекции на бумаге.

В открытых издательских системах появляется возможность присоединения различных устройств от разных производителей. Следовательно, необходима калибровка всех устройств друг для друга (рис. 1). Принципиально можно преобразовывать цвет из одних пространств в другие, например, из RGB в CMYK. При этом необходимо пройти через всю цепочку оборудования, используя между устройствами только индивидуальные, рассчитанные только на них, алгоритмы преобразований цветов, так как в открытых издательских системах можно присоединять неограниченное число устройств в открытых издательских системах можно присоединять неограниченное

число устройств. Это было бы очень затратной задачей. В ситуации, отображенной на рис. 1, видно, что для данной конфигурации оборудования потребовалось бы 25 преобразований между устройствами; например, настройку сканера нужно было создавать под мониторы А и В, под цветопробу, под плоттер и под печатный процесс отдельно.

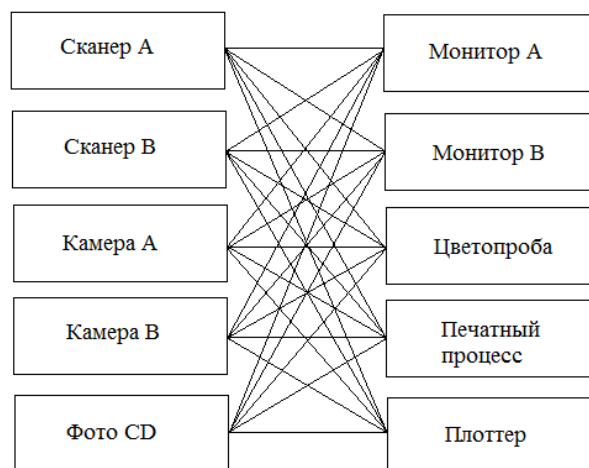


Рис. 1 – Схема классических связей между устройствами

Поэтому одним из важнейших направлений развития науки о цвете стало разработка и совершенствование имеющихся систем цветового контроля и так называемого управления цветом в приложениях цифровой обработки изображений, фотографии, печати и полиграфии. Появление данных систем стало возможным в связи с широким распространением средств вычислительной техники и их внедрением в полиграфическом производстве и фотографии. Их целью ставились разработка автоматизированного контроля цвета на различных стадиях его воспроизведения и обеспечение согласованной цветопередачи между различными воспроизводящими цвет устройствами и материалами за счет компенсации цветовых искажений, присущих этим устройствам и материалам, а также цветовых искажений, вызванных несовпадением их цветовых охватов. В теории и практике за подобными системами закрепилось общее наименование систем управления цветом либо, в соответствии с общепринятым английским термином, – «Color Management Systems» (CMS).

Для систематизации разработок в этой области и создания промышленных стандартов для обеспечения совместимости между различным оборудованием и программным обеспечением в 1993 году был создан Международный цветовой консорциум (International Color Consortium), сокращенно – ICC. Его основателями явились такие всемирно известные компании-производители программного и аппаратного имиджингового оборудования, как Adobe Systems, Agfa-Gevaert, Apple, Kodak, FOGRA, Microsoft, Silicon Graphics, Sun Microsystems. Позже в комитет вошли новые члены. Всего на настоящий момент их насчитывается свыше 80.

Основной работой, проведенной ICC, явилась разработка архитектуры систем управления цветом и

спецификации формата цветового профиля, на использовании которого осуществляется функционирование систем управления цветом [2]. По замыслу ICC цветовой профиль должен содержать всю информацию об особенностях воспроизведения цвета данным устройством либо материалом, которая необходима для возможности коррекции цвета изображения при его воспроизведении на данном устройстве либо материале. К такой информации относятся следующие данные: класс данного устройства (компьютерный монитор, струйный принтер, офсетный печатный станок и т. д.), метод цветосинтеза, посредством которого данное устройство воспроизводит изображение (аддитивный, четырехкомпонентный аддитивный, и т. д.), цветности излучателей либо основных цветов красителей, источник света, при котором должно рассматриваться изображение, параметры цветовых и тоновых преобразований, осуществляемых при воспроизведении изображения, и т. д. При этом спецификация цветового профиля определяет не только собственно формат цветового профиля, на основании которого различное программное обеспечение имеет возможность читать, создавать и модифицировать профили, но также и набор алгоритмов, посредством которых CMS может реализовать управление цветом воспроизводимого изображения [3–5].

После долгих лет обсуждений и доработок в 2005 году ICC выпустил окончательную спецификацию формата цветового профиля, которая в том же году Международной организацией по стандартизации (ISO) была принята в качестве официального международного стандарта – ISO 15076 [6–8]. Это явилось методологической основой для реализации системы, позволявшей автоматически вносить требуемые корректировки в изображение. Таким образом, зная особенности воспроизведения изображения данным устройством и материалом, подобную задачу можно решить.

Используя современные научные разработки, в работе [9] изложены результаты работы по созданию модели коррекции искажений в изображении на этапе допечатной подготовки и результаты анализа адекватности её работы. При этом, в отличие от рассмотренной ранее (рис. 1) была использована другая модель (рис. 2), где использовалось некое промежуточное, эталонное цветовое пространство, преобразование в которое и из которого осуществлялось для каждого из имеющихся устройств. Во втором варианте реализована наиболее приемлемая на сегодняшний день модель цветового преобразования. Это пространство является основой для системы управления цветом и носит название Profile Connection Space (PCS), пространство привязки профилей. Из названия видно, что речь идет о некоторых данных (профилях ICC [2]), которые описывают цвета устройств в некотором аппаратно-независимом пространстве, соединяя вместе которые, можно построить правильные преобразования между ними.

Профиль устройства – это формат данных, который содержит в себе сопоставления аппаратно-зависимых цветовых данных (например, CMYK) определенным аппаратно-независимым. В качестве последних служат такие модели МКО (Международная комиссия по освещению), как CIE XYZ и CIE Lab (L^*a^*b). Сопоставление имеет матричный или табличный вид. Матричный используется для описания мониторов и рабочих пространств (Adobe RGB, L* Star RGB). Он содержит следующую информацию: три тоновые кривые, XYZ координаты белой и черной точек, XYZ координаты всех колорантов монитора или пространства. На основании этой информации могут происходить цветовые преобразования в двух направлениях.

Многие матричные профили содержат только одно число для описания тоновых кривых. Это, как правило, гамма функция. При таком количестве элементов профиль имеет очень маленький размер и может свободно встраиваться в изображения.

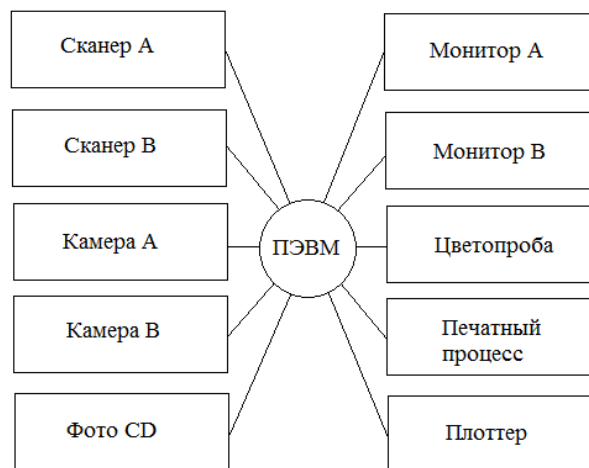


Рис. 2 – Схема связей между устройствами с профилями ICC

Табличные профили основаны на многомерных таблицах цветовых преобразований (CLUT). При этом достигается более подробное и точное описание печатающих устройств, где, например, учитываются такие параметры как GCR/UCR для CMYK устройств. Для каждого алгоритма пересчета внегамутных цветов (Rendering Intent, метод цветопередачи) создается своя таблица. Причем по структуре они одинаковы, а за их содержание отвечает приложение создания профиля.

При данной модели число цветовых преобразований в нашем случае сокращается до 10. Носителем модели цветового пространства и цветовых профилей является персональная ЭВМ (ПЭВМ).

Таким образом, на примере системы цифровой цветопробы удалось показать, что выбранная модель коррекции искажений цвета является точной и гибкой, учитывает особенности цветовоспроизведения различных устройств. Отклонения от нормативов сводятся к минимуму, и при полностью откалиброванном процессе появляется отличная возможность контроля воспроизведения цветовой информации.

Справедливости ради следует заметить, что, несмотря на уменьшение количества промежуточных

работ по настройке качественного цветовоспроизведения, затратное время на эти настройки и профилирование устройств в современной типографии остается достаточно большим. Количество же технических устройств, обеспечивающих качественный печатный процесс, постоянно растет. Стала актуальной задача оптимизации профиля, позволяющей ещё более сократить время на предпечатную подготовку полиграфического оборудования.

Решение задачи. Осуществить модифицирование цветового профиля, исследованного в [9], с целью сокращения количества необходимых цветовых профилей без потери качества печати в рамках действующей типографии. В результате проведенных исследований в типографии «НоваСофт» была разработана и предложена общая многооткликовая модель коррекции цвета (ММКЦ), представляющая собой многовыходную=многовыходную структуру (многомерную программную модель-профиль, реализованную как в пространстве ПЭВМ, так и в виде аппаратно-реализованной самостоятельной логики). На основе данной ММКЦ предлагается оптимизированный метод цветовой коррекции, позволяющий при допечатной подготовке к тиражированию высококачественных цветных изображений, максимально приближенных по воспроизведению цвета к оригиналу, учесть особенности восприятия цветовой яркости, насыщенности и цветового тона зрительной системой и получить в широком диапазоне в реальном масштабе времени практически независимую коррекцию по яркости, насыщенности и цветовому тону (рис. 3).

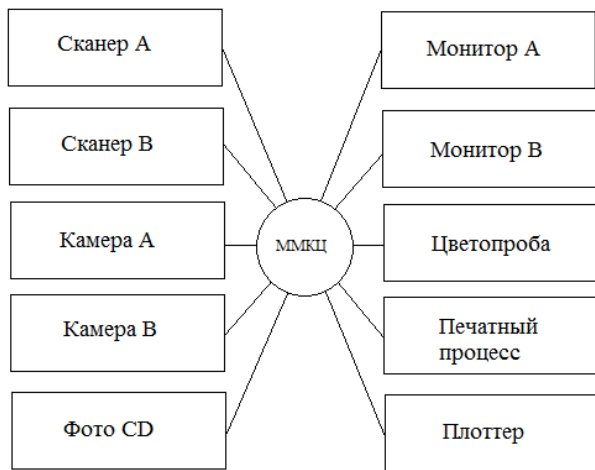


Рис. 3 – Схема связей между устройствами с ММКЦ

Проверка модели. Для проверки адекватности предложенной модели воспользуемся разработанными и утвержденными требованиями и методиками [6–8]: рассмотрим процесс управления цвета ввод-отображение-вывод с использованием ММКЦ и модуля управления цветом (СММ), которые могут быть, как в операционной системе, так и непосредственно в приложении. В качестве объекта для оценки точности цветовоспроизведения выберем систему цифровой цветопробы под управлением специального растрового процессора и имитируемый ею процесс.

Ввод данных об изображении. На выходе сканера (или цифровой камеры) выдаются значения RGB. Профиль сканера содержит только одну таблицу преобразования: из пространства устройства RGB в пространство связки ММКЦ. В зависимости от требуемых задач, необходимо произвести пересчет цветов в следующее в данном печатном процессе устройство. Если необходимо посмотреть, как изображение прошло процесс ввода и соответствует ли оно на устройстве отображения оригиналу – идет следующий этап.

Отображение оригинала. Значения цвета в ММКЦ обрабатываются для монитора или для редактирования изображения (Adobe RGB 1998, ECI RGB). Полученные значения PCS сопоставляются ближайшим значениям PCS устройства отображения.

Преобразование в пространство вывода. На этом этапе проводится операция, которая часто называется цветоделением. Снова идет аналогичный пересчет через ММКЦ. В качестве наиболее подходящей цели цветопередачи выбирается восприимчивая. Но если важно репродуцировать оригинал, то используется относительная колориметрическая. Если цвета представлены в модели устройства вывода (СМУК), то с помощью ММКЦ они также отображаются на мониторе. Однако если во время обработки изображения есть желание не переводить его в выводное пространство, а просто посмотреть, как оно будет выглядеть, то можно использовать в некоторых приложениях функции Proof Colors, которые посредством встроенных в неё профилей без преобразования данных будут имитироваться на мониторе. Система управления цветом решает эту задачу очень быстро.

Для оценки точности был выбран процесс FOGRA29L (ISO Uncoated, согласно [6–8]) и его имитация системой цифровой цветопробы. Имея качественный профиль системы цветопробы, можно начинать проверку непосредственной имитации процесса. Для этого в режиме имитации печатается шкала, использованная для построения печатного процесса (ECI2002 СМУК). После печати она измеряется спектрофотометром и сравнивается с исходной (FOGRA29L). Проверка проводится через цветовую модель Lab (L^*a^*b), которая собственно и является PCS. Для этого рассчитывается расстояние между двумя координатами в этом пространстве (ΔE). Величины отличия в нашем случае для имитации немелованной бумаги (4 тип) по стандарту ISO имеют следующие значения: среднее цветовое отклонение на 1485 полей шкалы ECI2002 равно 1,45; максимальное – 5,01. Результаты измерений и сравнений с нормой, приведенные в табл. 1, показали хороший результат, доказывающий адекватность предложенной модели, что позволяет использовать её на практике. Для быстрой оценки качества цветопробы используется также специальная шкала контроля, именуемая FOGRA/ugra Mediawedge и содержащая 46 цветовых полей. Для нее есть определенные нормативы (tolerances) [6–8], соблюдая которые, устанавливается, является ли цветопроба правильной и действительно ли она способна

воспроизводит цвета определенного печатного процесса.

Выводы. Таким образом, на примере системы цифровой цветопробы удалось показать, что выбранная модель коррекции искажений цвета является работоспособной и гибкой. Для подготовки печатного процесса данная модель является оптимальной по времени подготовки и количеству настроек. Отклонения от нормативов сводятся к минимуму, и при

полностью отработанном процессе появляется возможность оперативного контроля воспроизведения цветовой информации. Недостатком, по-нашему мнению, является необходимость построения модели заново при подключении в технологический процесс нового оборудования. Но данным недостатком обладают все современные варианты решения данной задачи.

Таблица 1 – Результаты имитации системой цветопробы печатного процесса ISO 12647-2 Paper Type 4

Цвет	Проверка FOGRA29L по 1485 полям шкалы ECI2002, значения Lab				Проверка FOGRA29L по 46 полям шкалы Ugra/FOGRA MedienKeil v 2.0, значения Lab			
	должен	есть	ΔE	норма ΔE	должен	есть	ΔE	Норма ΔE
Cyan	59; -26,5; -42,8	58,3; -27,4; -43,8	1,45	5 (2,5)	59; -26,5; -42,8	58,3; -27,5; -43,9	1,62	5 (2,5)
Magenta	55,0; 69,5; -4,0	54,7; -60,0; -4,6	0,91	5 (2,5)	55,0; 69,5; -40	54,8; 60,1; -4,7	0,96	5 (2,5)
Yellow	88,8; -1,6; 79,2	88,3; -2,4; 79,3	0,96	5 (2,5)	88,8; -1,6; 79,2	88,3; -2,6; 79,7	1,24	5 (2,5)
Black	31,9; 2,0; 2,1	32,4; 3,3; 2,2	1,38	5 (2,5)	31,9; 2,0; 2,1	32,4; 3,6; 2,5	1,71	5 (2,5)
Red	52,5; 55,4; 30,1	51,9; 56,3; 29,9	1,08	нет	52,5; 55,4; 30,1	51,6; 57,0; 30,4	1,83	нет
Green	52,2; -42,8; 18,5	51,6; -46,1; 18,5	3,33	нет	52,2; -42,8; 18,5	52,1; -45,7; 19,1	2,91	нет
Blue	38,5; 8,0; -32,2	38,5; 8,5; -32,8	0,86	нет	38,5; 8,0; -32,2	38,2; 8,9; -33,0	1,27	нет
Бумага	95,7; 0,6; -2,3	95,0; 1,2; -2,2	0,97	3 (2,5)	95,7; 0,6; -2,3	95,0; 1,0; -2,3	0,8	3 (2,5)
Значения ΔE	Есть		Норма		Есть		Норма	
Среднее значение	1,45		4 (3)		1,57		4 (3)	
Максимальное значение	5,01		10 (6)		3,64		10 (6)	

*Значения в квадратных скобках являются желаемыми.

Список литературы

1. Маргулис Ден. Photoshop 6 для профессионалов: классическое руководство по цветокоррекции / Ден Маргулис; Пер. с англ. – М. : ООО «РТВ-Медиа», 2001. – 400 с.
2. Фрейзер Брюс. Реальный мир управления цветом, искусство допечатной подготовки, 2-е изд. / Б. Фрейзер, К. Мэрфи, Ф. Бантинг; Пер. с англ. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 560 с.
3. Домасёв М. В. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения / М. В. Домасёв, С. П. Гнатюк. – СПб. : Питер, 2009. – 224 с.
4. Родни Э. Энциклопедия цветокоррекции. Всё, что вы хотели знать о цветокоррекции, и даже больше / Э. Родни; Пер. с англ. О. П. Бурмаковой. – М. : НТ Пресс, 2007. – 464 с.
5. Кулишова Н. Е. Поддержка стабильности цвета в открытых полиграфических системах : Монография / Н. Е. Кулишова, И. Б. Чеботарева, В. Ф. Ткаченко, Н. С. Гурьева. – Х. : ООО «Типография МАДРИД», 2013. – 192 с.
6. ISO 12647-1:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 1: Parameters and measurement methods. ISO 2013, 17 p.
7. ISO 12647-2:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 2: Offset lithographic processes. ISO 2013, 25 p.
8. ISO 12647-3:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 3: Coldset offset lithography on newsprint. ISO 2013, 23 p.
9. Азаренков В. И. Модель коррекции изображений на этапе допечатной подготовки на примере цифровой цветопробы / В. И. Азаренков, Е. В. Новикова, А. М. Слюсарь // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – Вып. 6/2 (18). – С. 103–107.

References (transliterated)

- Margulis Den. *Photoshop 6 dlja professionalov: klassicheskoe rukovodstvo po cvetokorrekcii* [Photoshop 6 for professionals: classic guide to color correction]. Moscow, OOO "RTV-Media" Publ., 2001. 400 p.
- Frejzer B., Mjerfi K., Banting F. *Real'nyj mir upravlenija cvetom, iskusstvo dopechatnoj podgotovki* [Real world color management, the art prepress]. Moscow, OOO "I. D. Vil'jams" Publ., 2006. 560 p.
- Domasjov M. V., Gnatjuk. S. P. *Cvet, upravlenie cvetom, cvetovye raschety i izmerenija* [Color, color management, color calculations and measurements]. Sankt-Peterburg, Piter Publ., 2009. 224 p.
- Rodni Je. *Jenciklopedija cvetokorrekcii. Vsjo, chto vy hoteli znat' o cvetokorrekcii, i dazhe bol'she* [Encyclopedia of color correction. Everything you wanted to know about color correction and more]. Moscow, NT Press Publ., 2007. 464 p.
- Kulishova N. E., Chebotareva I. B., Tkachenko V. F., Gur'eva N. S. *Podderzhka stabil'nosti cveta v otkrytyh poligraficheskikh sistemah* [Support for color stability in open systems printing]. Kharkov, OOO "Tipografija MADRID" Publ., 2013. 192 p.
- ISO 12647-1:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 1: Parameters and measurement methods. ISO Publ., 2013, 17 p.
- ISO 12647-2:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 2: Offset lithographic processes. ISO Publ., 2013, 23 p.
- ISO 12647-3:2013. Graphic technology – Process control for the production of half-tone colour separations, proof and production prints – Part 3: Coldset offset lithography on newsprint. ISO Publ., 2013, 23 p.
- Azarenkov V. I., Novikova E. V., Sljusar A. M. Model korrekcii izobrazhenij na jetape dopechatnoj podgotovki na primere cifrovoj cvetoproby [The model image correction at the stage of prepress, for example, a digital color proof]. *Vostochno-evropejskij zhurnal pere-dovyh tehnologij*. 2005, no. 6/2 (18), pp. 103–107.

Поступила (received) 13.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

До питання оптимізації моделі корекції спотворень кольору в поліграфії / В. І. Азаренков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 85–90. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

К вопросу оптимизации модели коррекции искажений цвета в полиграфии / В. И. Азаренков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 85–90. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

Optimizing models of the distortion correction color in printing / V. I. Azarenkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 85–90. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Азаренков Володимир Ілліч – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та управління; тел.: (050) 524-84-84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

Азаренков Владимир Ильич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (050) 524-84-84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

Azarenkov Volodimir Illich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of system analysis and management; tel.: (050) 524-84-84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

Ю. Є. СУЛІМОВА, В. В. ЛЮБЧЕНКО

ПРО ВЛАСТИВІСТЬ БАЛАНСУВАННЯ КОМАНДНИХ РОЛЕЙ НА ПРОТЯЗІ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТУ

Побудована модель переходів між командними ролями на основі ланцюга Маркова. Виконано моделювання переходів між командними ролями на протязі виконання проектів дизайну, проектів реалізації та комбінованих проектів. Зроблено висновок про природність балансування командних ролей за рахунок переходу деяких членів команди до вторинних ролей.

Ключові слова: командні ролі Белбіна, балансування командних ролей, ланцюг Маркова, анкета самосприйняття, експертне оцінювання.

Построена модель переходов между командными ролями на основе цепи Маркова. Выполнено моделирование переходов между командными ролями в течение выполнения проектов дизайна, проектов реализации и комбинированных проектов. Сделан вывод о естественности балансировки командных ролей за счет перехода некоторых участников команды на вторичные роли.

Ключевые слова: командные роли Белбина, балансировка командных ролей, цепь Маркова, анкета самовосприятия, экспертное оценивание.

Belbin's research explained that a full complement of the team roles is the best chance for a team's success. So one of important task for a project manager is a balance of team members based on Belbin roles. We developed the model of team role changing during the software project development. To do it we built a model of team role changing based on discrete Markov chain and parametrize it based on Self-Perception Inventory and experts evaluation. Developed model provides the possibility to simulate team role changing during the downright design, downright implementation and variety projects. It is concluded that the natural behavior of team members is to amend the primary role to secondary one to achieve the balance in the team.

Keywords: Belbin team roles, team roles balancing, Markov chain, Self-Perception Inventory, expert evaluation.

Вступ. Важливим фактором забезпечення найкращих результатів для проектів командою розробки є формування команди учасниками з вірними ролями та вірними характеристиками [1].

Одним з практичних інструментів для цього є аналіз командних ролей Белбіна, який в своїй роботі намагався дати відповідь на питання, чому проектні команди бувають успішними або неуспішними [2]. Він показав, що ефективна робота команди пов'язана з її балансуванням в термінах командних ролей учасників команди.

Здатність формувати ефективні команди є дуже важливою для багатьох, особливо для малих і середніх, організацій, які працюють з обмеженим бюджетом і не мають великого вибору працівників під час формування команд для окремих проектів. Тому під час формування команди менеджер проекту не завжди має можливість зібрати представників всіх командних ролей.

Відповідно до популярної теорії [3] процес формування команди складається з чотирьох фаз, на останній з яких команда досягає найвищої ефективності сумісної роботи над загальною метою за рахунок визначення і застосування норм підхожої поведінки. Актуальним питання є питання, чи є однією з цих норм прагнення команди до балансування впливу командних ролей.

Аналіз стану питання. На основі чисельних спостережень за груповою роботою та засобів вимірювання успіху команд Белбін визначив вісім командних ролей, які описують потреби та здатності як команд, так і окремих їх учасників. Було показано, що повний набір командних ролей забезпечує найбільшу ймовірність успіху команди, хоча певні ситуації та проблеми найбільше пасують окремим з ролей. Розглянемо коротко властивості кожної з ролей.

Виконавець (Implementer – IMP) перетворює концепції на робочі процедури. Член команди з досить вузькими та глибокими професійними компетенціями, з високим рівнем дисципліни, наполегливістю та здатністю планувати всю діяльність. Характерною особливістю ролі є увага до деталей.

Контролер (Completer-Finisher – CF) забезпечує доведення до завершення виконання всіх розпочатих планів. Він намагається знайти і знаходить незадоволені потреби команди та бере на себе ті задачі, які інші намагаються оминати.

Формувач (Shaper – SH) – універсал-одинак, потенційно може зробити весь проект самостійно, з жорсткими правилами мотивації, що забезпечує виконання та завершення робіт. В загальному випадку йому пасують тимчасові позиції, наприклад, лідера команди в екстремальній ситуації або особи, що повинні прийняти непопулярні рішення, які навіть не враховують думки всієї команди.

Мислитель (Plant – PL) є джерелом креативних і оригінальних ідей для команди. Йому притаманна тенденція ігнорувати звичні і творити й обирати нетрадиційні рішення. Вирішує складні завдання та проблеми.

Дослідник ресурсів (Resource Investigator – RI) забезпечує команду зовнішніми ресурсами так само, як Мислитель – внутрішніми ідеями і ресурсами. Завжди у пошуках того, що може принести користь команді, досліджує усі нові тенденції та знання, має багато корисних контактів.

Оцінювач (Monitor-Evaluator – ME) є певною мірою ізольованою роллю. Аналітик, зі стратегічним мисленням, утримує команду від концептуальних помилок і показує недоліки плану до того, як вони негативно вплинуть на виконання проекту. Частіше за все опонує до Мислителя та Дослідника ресурсів.

Координатор (Coordinator – CO) є позитивним мотиватором для команди, який не обов'язково є технічним спеціалістом. В загальному випадку він займає постійну лідерську позицію. Добре знає компетенції всіх членів команди, організує їх на досягнення спільної мети.

Робітник (Team Worker – TW) є учасником команди, який згладжує протиріччя в команді і допомагає їй учасникам успішно співпрацювати. Він створює і підтримує командний дух. Є невидим лідером, який згуртовує команду при налагодженому процесі, але у критичному становищі має певні труднощі з прийняттям рішень. Має високий рівень адаптованості.

Ролі можуть бути згруповані за різними характеристиками. Наприклад, за напрямком основних зусиль можемо розрізнити групи управлінських (дослідник ресурсів, координатор і робітник), виконавчих (формуваць, виконавець і контролер) та розумових (мислитель і оцінювач) ролей.

Найбільш важливим питанням при формуванні команди є визначення адекватної комбінації командних ролей, що пов'язано з етапами виконання проекту. Це, звичайно, відокремлені: етап планування, етап реалізації та варіації попередніх двох етапів [4]. Але, для покращення аналізу переходів між ролями та необхідністю виділення ролей, які виходять на перший план та впливають на досягнення певного результату згідно того, над чим у зазначений час працює команда, ми розглянемо позначені етапи як проекти. Відповідно, такі проекти будуть належати до однієї з трьох груп:

- проекти планування;
- проекти реалізації;
- комбіновані проекти.

Можемо також зазначити, що такій поділ проекту на окремі частини допоможе актуалізувати певні командні ролі, які при традиційному сприйнятті проекту як динамічного, але закритого цілого, частіше за все виглядають як другорядні. Проте така другорядність не сприяє ефективності виконання та завершення проекту. У запропонованому нами вигляді для проектів планування або реалізації деякі з командних ролей можуть бути відсутні, але деякі стають необхідними настільки, що від цього прямо залежить результат виконання проекту. В цілому такий підхід, серед іншого, впливає на мотивацію кожного з учасників команди. Але, головне – це підвищує успішність виконання проекту та мінімізує ресурсні втрати.

Проекти планування розпочинаються з пошуку ідей і визначення найкращої з них, після чого формуються цілі і задачі розробки та складається план робіт. Такі проекти потребують перед усім креативних індивідуумів, які здатні запропонувати рішення проблеми. Найбільш важливими для таких проектів є розумові/інтелектуальні ролі Мислителя (PL), Дослідника ресурсів (RI) і Оцінювача (ME), а також потрібна управлінська роль Координатора (CO).

Проекти реалізації сконцентровані на виконанні робіт, які дозволяють перетворити плани на продукт. Цінність для таких проектів становлять представники

виконавчих ролей Формувача (SH), Виконавця (IMP) і Контролера (CF), а також Робітника (TW).

В комбінованих проектах потрібними є представники всіх ролей, але треба мати на увазі, що першорядність тут буде постійно змінюватись.

Для визначення командних ролей звичайно застосовують анкету самосприйняття (Self Perception Inventory), яка була запропонована Белбіним для вимірювання поведінкових характеристик, що їх демонструють учасники команди [5]. Ця анкета оцінює ступінь індивідуальної схильності до кожної з ролей.

Внесок в командну роботу кожного учасника описують первинними і вторинними ролями. Первинна роль – це поведінка, яку учасник демонструє за нормальних, звичайних обставин. Перейти до вторинної ролі він може, наприклад, за умови спеціальних потреб команди в ролі, яка не є первинною для жодного учасника команди, або у випадку, коли виникає конфлікт інтересів між двома учасниками з однаковими первинними ролями.

Таким чином, для встановлення ефективного балансу в команді учасники команди мають не лише вміння вірно та своєчасно розпізнавати та використовувати свої сильні риси, а і приймати вторинні ролі, щоб запобігти конфліктам через дублювання ролей, задовольнити потреби команди або вирішити певні проблеми [6].

Постановка задачі дослідження. Сформулюємо наступне твердження.

В процесі формування команди проекту ситуативно та іноді без втручання менеджменту відбувається балансування командних ролей за рахунок переходу деяких членів команди до виконання вторинних ролей.

Задачею цього дослідження є перевірка справедливості сформульованого твердження. Для цього необхідно побудувати модель переходів між командними ролями на основі ланцюгів Маркова, параметризувати модель, виконати обчислювальний експеримент і проаналізувати отримані результати.

Методи дослідження. Основою запропонованої моделі є дискретний ланцюг Маркова [7], стани якого відповідають окремим командним ролям: S_1 – виконавець, S_2 – контролер, S_3 – формуваць, S_4 – мислитель, S_5 – оцінювач, S_6 – дослідник ресурсів, S_7 – координатор, S_8 – робітник.

Моделювання переходів між ролями здійснюється за рахунок введення зав'язків між станами S_1 – S_8 , які дають можливість визначати кількісні характеристики для станів і переходів між ними. Всі переходи зі стану S_i утворюють повну групу подій, тобто ймовірність настання цих подій дорівнює одиниці:

$$\sum_{j=1}^8 p_{ij} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, 8\}, \quad (1)$$

де p_{ij} – ймовірність переходу зі стану S_i до стану S_j .

Сума ймовірностей всіх станів $P_i(k)$ на кожному кроці k також дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^8 P_i(k) = 1, \forall k \in \{1, 2, \dots, \infty\}, \quad (2)$$

де $P_i(k)$ – ймовірність i -го стану на кроці k .

Під кроком k розуміємо певний керуючий вплив, який змусив учасника команди змінити роль.

Для однорідного ланцюга Маркова визначення ймовірностей станів на $(k + 1)$ -му кроці виконується в загальному випадку за формулою повної ймовірності:

$$\begin{pmatrix} P_1(k+1) \\ P_2(k+1) \\ \vdots \\ P_8(k+1) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} P_1(k) \\ P_2(k) \\ \vdots \\ P_8(k) \end{pmatrix}^T \times \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{18} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{81} & P_{82} & \dots & P_{88} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Після побудови структурної моделі переходів між ролями у формі ланцюга Маркова слід виконати параметричну ідентифікацію моделі. Ідентифікація ланцюга Маркова для дослідження виконується з використанням анкети самосприйняття Белбіна для оцінювання ймовірностей переходів між первинними та вторинними ролями та групового експертного оцінювання для визначення ймовірностей того, що учасник команди ситуативно змінить командну роль, відреагувавши на керуючий вплив. Параметризація моделі

дозволяє віддзеркалити за допомогою ланцюга Маркова традиційну поведінку учасників команд з розробки програмного забезпечення.

Результати чисельного моделювання. Для побудови і параметризації моделі були залучені учасники команд проектів з розробки програмного забезпечення.

Для визначення структури ланцюга Маркова і частоти переходів між окремими первинними і вторинними ролями, а також початкових ймовірностей $P_i(k)$ було враховано результати 119 анкет самосприйняття.

До групи експертів було залучено 34 особи, які мали успішний досвід керування командами з не менше ніж трьох осіб в двох або більше проектах середньої або високої складності. Під час оцінювання експерти визначали ймовірності p_{ij} того, що учасник команди не змінить свою роль після керуючого впливу. Відповідно ймовірність зміни командної ролі становить $(1 - p_{ij})$. Щоб отримати ймовірності переходів до окремих ролей, ця величина була розділена відповідно до частот переходів, які були визначені під час анкетування.

Отримані як результат розмічені граfi відповiдних ланцюгiв Маркова показанi на рис. 1.

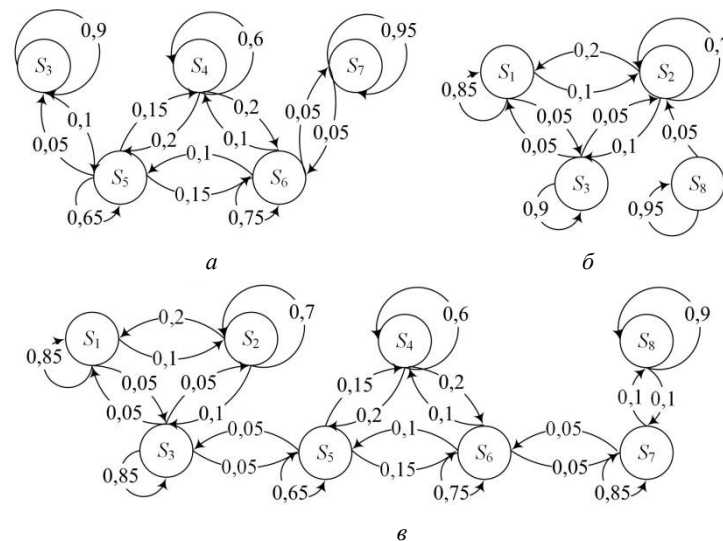


Рис. 1 – Розмічені граfi ланцюгiв Маркова для моделювання переходiв мiж командними ролями: а – в проектах планування; б – в проектах реалiзацiї; в – в комбiнованих проектах

Вираз (3) забезпечує можливість виконання практичних розрахунків для моделі.

Як зазначалось вище, для команди проекту розробки в цілому бажаною властивістю є присутність в команді представників всіх ролей. Проте за первинними ролями в проектах планування, проектах реалізації та комбінованих проектах частотний розподіл суттєво розрізняється (рис. 2).

Якщо сформульоване твердження вірне, то різниця між ймовірностями окремих командних ролей (або станів ланцюга Маркова, як ми зазначили вище) буде зменшуватися з плином проекту. Для перевірки гіпотези проаналізуємо зміну значення дисперсії ймовірностей на перших кроках виконання проектів (рис. 3).

Рис. 3 показує, що дисперсія ймовірностей командних ролей зменшується з плином проекту незалежно від типу проекту. Також з цього рисунку видно, що швидкість зменшення ймовірності найбільша на перших кроках, а потім поступово зменшується. Тобто на початкових фазах формування команди зміна командних ролей більш ймовірна, оскільки вона може статися не лише під впливом певних обставин, ситуацій тощо, а й бути результатом керуючого впливу з боку менеджера проекту, втручання якого збільшується саме в критичних обставинах та на перших етапах проекту розробки.

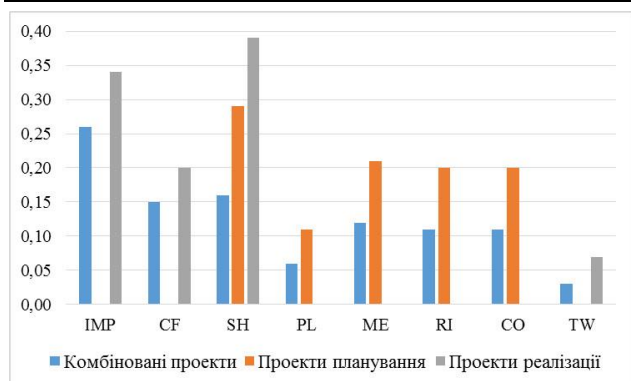


Рис. 2 – Початкові ймовірності командних ролей для різних типів проектів

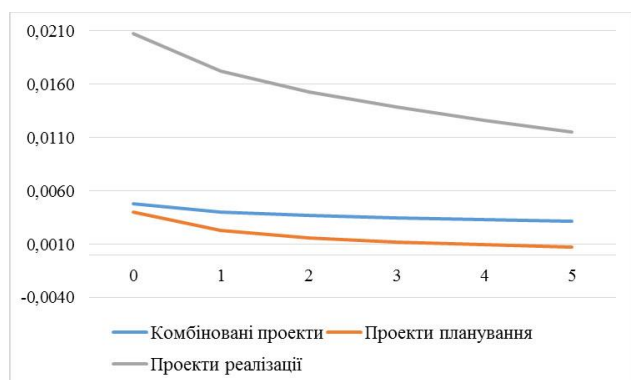


Рис. 3 – Зміна дисперсії ймовірностей командних ролей

Висновки. В роботі за допомогою математичного моделювання виконувалась перевірка твердження про ситуативність балансування командних ролей за рахунок переходу деяких членів команди до виконання вторинних ролей в процесі формування команди проекту. Для цього на основі ланцюга Маркова була побудована математична модель, виконана параметризація моделі, а потім проведено обчислювальні експерименти. Отримані результати підтверджують справедливості твердження для проектів різних типів.

Список літератури

1. Syed-Abdullah S. L. Team achievements equality using fuzzy rule-based technique / S. L. Syed-Abdullah, M. Omar, M. F. I. M. Idris // World Applied Sciences Journal. – 2011. – Vol. 15, No. 3. – P. 359–363.
2. Belbin R. M. Management Teams. Why They Succeed or Fail / R. M. Belbin. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2010. – 208 p.
3. Tuckman B. W. Developmental sequence in small groups / B. W. Tuckman // Psychological Bulletin. – 1965. – Vol. 63, No. 6. – P. 384–399.
4. Fatahi S. Design and Implementation of the Expert System for Balancing Team Formation on the Basis of Belbin Team Role / S. Fatahi, A. R. Lorestani // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. – 2010. – Vol. 2183, No 1. – P. 226–230.
5. Belbin R. M. A reply to the Belbin Team-Role Self-Perception Inventory by Furnham, Steele, & Pendleton / R. M. Belbin // Journal of Occupational and Organizational Psychology. – 1993. – Vol. 66, No 3. – P. 259–260.
6. Fisher S. G. The structure of Belbin's team roles / S. G. Fisher, T. A. Hunter, W. D. K. Macrosson // Journal of Occupational and Organizational Psychology. – 1998. – Vol. 71, No 3. – P. 283–288.
7. Турчин В. Н. Марковские цепи: Основные понятия, примеры, задачи / В. Н. Турчин, Е. В. Турчин. – Днепропетровск : ЛизуновПресс, 2016. – 192 с.

References (transliterated)

1. Syed-Abdullah S. L., Omar M., Idris M. F. I. M. Team achievements equality using fuzzy rule-based technique. *World Applied Sciences Journal*. Vol. 15, No. 3, 2011, pp. 359–363.
2. Belbin R. M. *Management Teams. Why They Succeed or Fail*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2010. 208 p.
3. Tuckman B. W. Developmental sequence in small groups. *Psychological Bulletin*. Vol. 63, No. 6, 1965, pp. 384–399.
4. Fatahi S., Lorestani A. R. Design and Implementation of the Expert System for Balancing Team Formation on the Basis of Belbin Team Role. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. Vol. 2183, No 1, 2010, pp. 226–230.
5. Belbin R. M. A reply to the Belbin Team-Role Self-Perception Inventory by Furnham, Steele, & Pendleton. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*. Vol. 66, No 3, 1993, pp. 259–260.
6. Fisher S. G., Hunter T. A., Macrosson W. D. K. The structure of Belbin's team roles. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*. Vol. 71, No 3, 1998, pp. 283–288.
7. Turchin V. N., Turchin I. V. *Markovskie tsepi: Osnovnye poniatia, primery, zadachi* [Markov chains: basic concepts, examples, tasks]. Dnepropetrovsk, LizunovPress, 2016. 192 p.

Надійшла (received) 08.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Про властивість балансування командних ролей на протязі виконання проекту / Ю. Є. Сулімова, В. В. Любченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 91–95. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

О свойстве балансировки командных ролей в течении выполнения проекта / Ю. Е. Сулімова, В. В. Любченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 91–95. Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

About team roles balancing during project execution / I. Sulimova, V. Liubchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 91–95. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сулімова Юлія Євгенівна – Одеський національний політехнічний університет, завідувач Навчально-виробничої лабораторії «Сучасні бізнес-технології», Центру партнерства с підприємствами; тел.: 093-374-0163; e-mail: julia.sulimova@gmail.com.

Сулімова Юлія Євгенівна – Одесский национальный политехнический университет, заведующая учебно-производственной лабораторией «Современные бизнес-технологии», Центра партнерства с предприятиями; тел.: 093-374-0163; e-mail: julia.sulimova@gmail.com.

Sulimova Iuliia – Odessa National Polytechnic University, Head of the Training and production laboratory "Modern business technologies", Center of Partnership with Enterprises; tel.: 093-374-0163; e-mail: julia.sulimova@gmail.com.

Любченко Віра Вікторівна – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри системного програмного забезпечення; тел.: (050) 392-2150; e-mail: lvv@edu.opu.ua.

Любченко Вера Викторовна – доктор технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, профессор кафедры системного программного обеспечения; тел.: (050) 392-2150; e-mail: lvv@edu.opu.ua.

Liubchenko Vira – Doctor of Technical Sciences, Docent, Odessa National Polytechnic University, Professor at the Department of System Software; tel.: (050) 392-2150; e-mail: lvv@edu.opu.ua.

ЗМІСТ

Александрова Т. Е., Мазманишвили А. С., Сидоренко А. Ю. Имитационное моделирование случайных возмущений при решении задач параметрического синтеза танковых информационно-управляющих систем.....	3
Марченко И. И., Жигло А. В., Марченко И. Г. Температурно-аномальная диффузия в недодемпфированных периодических системах.....	9
Бородай И. И. Моделирование процесса переноса ионов через мембраны клеток под воздействием внешнего электромагнитного поля.....	18
Довбиш А. С., Симоновський Ю. В., Коробченко, Летюга М. А. Інформаційно-екстремальний алгоритм машинного навчання системи розпізнавання транспортних засобів.....	22
Дрофа В. О. Оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнаванні при машинному навчанні.....	29
Москаленко В. В., Фонта Н. Г. Структура системы Enterprise Performance Management с учетом технологии каскадирования ключевых показателей деятельности.....	34
Шевченко С. В. О формировании состава задач интеллектуальных систем управления в электроэнергетике.....	41
Нескорородева Т. В. Методика формализации обобщенного полиальтернативного трехмерного прямого анализа данных синтетического учета расходов как основы информационной технологии аудита.....	46
Орловський Д. Л., Лютенко І. В., Лілікович С. О. Підхід та засоби вимірювання суб'єктної диверсності в умовах багатоверсійної розробки програмного забезпечення.....	55
Карпенко В. В. Метод решения задачи маршрутизации в реальном времени.....	59
Левыкин В. М., Чалая О. В. Метод актуализации знание-емких бизнес-процессов.....	65
Чальї С. Ф., Прибыльнова И. Б. Ситуационный подход к представлению темпоральных знаний прецедентов.....	70
Шабанов С. Ю., Новиков Ю.С. Представление знаний сложного структурируемого объекта в задачах диагностирования с использованием моделей.....	74
Левыкин В. М., Юрьев И. А. Модель выбора набора ИТ-сервисов для конечных пользователей.....	78
Азаренков В. И. К вопросу оптимизации модели коррекции искажений цвета в полиграфии.....	85
Сулімова Ю. Є., Любченко В. В. Про властивість балансування командних ролей на протязі виконання проекту.....	91

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХП»**

Збірник наукових праць

Серія:
Системний аналіз, управління
та інформаційні технології

№ 45 (1217) 2016

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. М. Д. Годлевський,
д-р техн. наук, проф. О. С. Куценко
Технічний редактор канд. техн. наук, проф. М. І. Безменов

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».
Кафедра системного аналізу і управління.
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид № 40–16.

Підп. до друку 24.12.2016 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,0.
Тираж 100 пр. Зам. № 772. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28