

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

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«ХПІ»**

*Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*

№ 58 (1167) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2015

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 58 (1167). – 128 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 Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).*

#### **Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**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.;

Ю. В. ТИМОФІЄВ, 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 № 11 від 25 грудня 2015 р.

М. Д. ГОДЛЕВСКИЙ, Э. Е. РУБИН, А. А. ГОЛОСКОКОВА

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Предлагается модель среднесрочного планирования (динамическая постановка задачи) улучшения качества процесса разработки программного обеспечения на основе технологии СММИ (capability maturity model integration), представляющей собой модель зрелости. Используются функции полезности двух групп критериев: степени достижения целевого профиля и ресурсного обеспечения (финансовая и временная составляющие). Решение данной задачи определяет целевой профиль, который в дальнейшем составит основу статической постановки задачи.

**Ключевые слова:** качество, модель зрелости, функция полезности, целевой профиль, динамическая модель.

**Введение.** В настоящее время разработка программного обеспечения (ПО) является одной из главных составляющих экономики Украины. Сегодня высокое качество процесса разработки (ПР) ПО воспринимается как обязательный компонент. Поэтому для компаний–разработчиков вопрос обеспечения качества ПО является одним из первоочередных. Существуют различные стандарты, регламентирующие наборы процессов жизненного цикла программных систем, такие как IEEE, ISO – 12207, СММИ [1] и другие. Цель этих стандартов – гарантировать, что конечный продукт будет соответствовать требованиям рынка и удовлетворять конечных пользователей. Гибкость непрерывной модели СММИ [2, 3] позволяет компании разработчиков оценить наиболее важные этапы ПР ПО, а так же уровень зрелости всего процесса разработки ПО. В работах [4, 5] впервые проведена формализация модели СММИ и разработана математическая динамическая модель и алгоритм планирования улучшения качества ПР ПО. Исследования показали, что задача является NP–сложной. Поэтому актуальными являются дальнейшие исследования, посвященные усовершенствованию модели и алгоритма с точки зрения, соответственно, адекватности ПР ПО и скорости работы.

**Постановка проблемы.** Задача планирования улучшения качества ПР ПО может быть представлена в виде проблемы скользящего планирования, которое предполагает синтез статических и динамических моделей (моделей текущего и среднесрочного планирования). В работе [6] были разработаны статические модели планирования улучшения качества ПР ПО на основе модели зрелости СММИ.

При динамической постановке стоит задача определения оптимального варианта продвижения ПР ПО на некотором плановом периоде  $[0, T]$  к более высокому уровню качества, где  $T$  – продолжительность рассматриваемого планового периода. В работе качество характеризуется альтернативными вариантами продвижения ПР ПО к более высокому уровню зрелости согласно модели СММИ, а так же стратегиями использования различных видов ресурсов для достижения определенного уровня зрелости.

Целью исследования является разработка динамической модели планирования улучшения качества ПР ПО на основе функций полезности двух групп критериев:

- 1) степень достижения целевого профиля;
- 2) ресурсное обеспечение (финансы и время).

**Модель среднесрочного планирования (динамическая постановка задачи).** Предлагается целевую функцию динамической модели формировать в виде аддитивной функции, каждая составляющая которой представляет прирост функции полезности [7] на соответствующем подпериоде планирования. Так как функция полезности состоит из двух групп критериев, рассмотрим формирование её отдельных составляющих. В работе [6] синтезирована функция полезности частного критерия степени достижения целевого профиля  $P_{il}(\{x_{is}^j(t)\})$  на уровне  $i$ -й фокусной области. Дискретная переменная  $x_{is}^j(t)$  принимает значения целых чисел, каждое из которых соответствует уровню возможности  $j$ -й практики, которая участвует в обеспечении достижения  $s$ -й цели  $i$ -й фокусной области на  $t$ -м подпериоде планирования.

Тогда величина прироста функции полезности на  $t$ -м подпериоде планирования для каждой рассматриваемой фокусной области записывается следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta P_{il}^t(\{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\}) &= \\ &= P_{il}(\{x_{is}^j(t)\}) - P_{il}(\{x_{is}^j(t-1)\}), t \in [1, T]. \end{aligned}$$

Исходя из построения функции полезности следует, что  $P_{il}(\{x_{is}^j(0)\}) = 0 \forall i$ .

Прирост функции полезности  $l$ -й категории в пределах  $k$ -го уровня зрелости на  $t$ -м подпериоде запишем следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta Q_{kl}^t(\{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\}) &= \\ &= \sum_{i \in I_k^l} \gamma_{il} \Delta P_{il}^t(\{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\}), t \in [1, T], \end{aligned}$$

где

$$\gamma_{il} \geq 0, i \in I_k^l, \sum_{i \in I_k^l} \gamma_{il} = 1, l \in L_k, k \in K.$$

При этом будем считать, что все рассматриваемые в работе весовые коэффициенты важности не меняются в течение рассматриваемого планового подпериода и аналогичны тем, которые используются при статической постановке задачи. Приросты функций полезности, соответственно, на уровне отдельных категорий модели СММИ и на уровне всего ПР ПО имеют вид

$$\Delta W_1^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) = \sum_{k \in K} \delta_{k1}^l \Delta Q_{k1}^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), t \in [1, T],$$

где

$$\delta_{k1}^l \geq 0, k \in K, \sum_{k \in K} \delta_{k1}^l = 1, l \in L = \bigcup_{k \in K} L_k.$$

$$\Delta V_1^l(\chi(t-1), \chi(t)) = \sum_{l \in L} \eta_l^l \Delta W_1^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), t \in [1, T],$$

где

$$\eta_l^l \geq 0, l \in L, \sum_{l \in L} \eta_l^l = 1.$$

С целью упрощения дальнейших записей введены матрицы  $\chi(t) = \{x_{is}^j(t)\}, t \in [0, T]$ , определяющие состояния ПР ПО на  $t$ -м подпериоде планирования.

Прирост функции полезности, который реализован к началу первого подпериода планирования будет приносить пользу ПР ПО на протяжении всего планового периода  $[1, T]$  (на каждом из  $T$  подпериодов).

Прирост функции полезности, реализованный к началу второго подпериода, будет приносить пользу ПР ПО на протяжении последующих  $T-1$  подпериодов и т.д., прирост функции полезности к началу  $T$ -го подпериода будет приносить пользу только в течении  $T$ -го подпериода. Таким образом, логично считать, что весовые коэффициенты важности приростов функции полезности  $\xi_t$  на каждом подпериоде планирования должны быть пропорциональны количеству подпериодов, на которых она воздействует на ПР ПО:

$$\xi_1 = \frac{T}{\sum_{\tau=1}^T \tau}, \xi_2 = \frac{T-1}{\sum_{\tau=1}^T \tau}, \dots, \xi_T = \frac{1}{\sum_{\tau=1}^T \tau}.$$

В общем виде

$$\xi_t = \frac{T-(t-1)}{\sum_{\tau=1}^T \tau}, t \in [1, T].$$

Перейдем к рассмотрению вопроса формирования функции полезности ресурсного обеспечения, а так же величины ее изменения при переходе с  $(t-1)$ -го на  $t$ -й подпериод планирования. Для каждой  $j$ -й практики вводятся две треугольные матрицы ресурсов, элементы которых  $r_{is}^{j\tau}(i, j)$  определяют необходимые финансовые ресурсы ( $\tau=2$ ) и ресурсы времени ( $\tau=3$ ) при переходе с уровня возможности  $x_{is}^j(t-1)$  на уровень возможности  $x_{is}^j(t)$  (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица ресурсов для  $j$ -й практики

$x_{is}^j(t)$				
$x_{is}^j(t-1)$	0	1	2	3
0	$r_{is}^{j\tau}(0,0) = 0$	$r_{is}^{j\tau}(0,1)$	$r_{is}^{j\tau}(0,2)$	$r_{is}^{j\tau}(0,3)$
1		$r_{is}^{j\tau}(1,1) = 0$	$r_{is}^{j\tau}(1,2)$	$r_{is}^{j\tau}(1,3)$
2			$r_{is}^{j\tau}(2,2) = 0$	$r_{is}^{j\tau}(2,3)$
3				$r_{is}^{j\tau}(3,3) = 0$

Переменные  $\{x_{is}^j(t)\}$  удовлетворяют условию

$$x_{is}^j(t) \in [0, 3], j \in J_i^s, s \in S, i \in I_k^l, l \in L_k, k \in K, t \in [0, T]. \quad (1)$$

Ресурсы, необходимые при переходе с  $(t-1)$ -го на  $t$ -й подпериод планового периода на уровне  $i$ -й фокусной области, а так же величина изменения соответствующей функции полезности определяются на основе следующих выражений

$$R_{i\tau} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) =$$

$$= \sum_{s \in S_j} \sum_{j \in J_i^s} r_{is}^{j\tau} \left( x_{is}^j(t-1), x_{is}^j(t) \right),$$

$$\Delta P_{i\tau}^l \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) =$$

$$= \frac{R_{i\tau} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right)}{\left( R_{i\tau}^{HL} - R_{i\tau}^{HX} \right)},$$

$$\tau = 2, 3, i \in I_k^l, l \in L_k, k \in K, t \in [1, T].$$

Величину изменения функции полезности  $l$ -й категории в пределах  $k$ -го уровня зрелости на  $t$ -м

подпериоде запишем следующим образом

$$\begin{aligned} & \Delta Q_{k\tau}^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) = \\ & = \sum_{i \in I_k^l} \gamma_{i\tau} \Delta P_{i\tau}^l \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), \quad t \in [1, T], \end{aligned}$$

где

$$\gamma_{i\tau} \geq 0, i \in I_k^l, \sum_{i \in I_k^l} \gamma_{i\tau} = 1, \tau = 2, 3, l \in L_k, k \in K.$$

Для финансовых ( $\tau = 2$ ) и временных ( $\tau = 3$ ) ресурсов величины изменения функций полезности на уровне отдельных категорий модели СММИ определяются на основе следующей зависимости

$$\begin{aligned} & \Delta \hat{W}_\tau^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) = \\ & = \sum_{k \in K} \delta_{k\tau}^l \Delta Q_{k\tau}^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), \quad t \in [1, T], \\ & \delta_{k\tau}^l \geq 0, k \in K, \sum_{k \in K} \delta_{k\tau}^l = 1, \tau = 2, 3, l \in L. \end{aligned}$$

Далее определяем агрегированную величину изменения функции полезности ресурсного обеспечения на  $t$ -м подпериоде планирования в пределах  $l$ -й категории, которая формируется на основе функций полезности финансов и времени

$$\begin{aligned} & \Delta W_2^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right) = \\ & = \sum_{\tau=2}^3 \mu_\tau^l \Delta \hat{W}_\tau^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), \quad t \in [1, T], \end{aligned}$$

где

$$\mu_\tau^l \geq 0, \tau = 2, 3, \mu_2^l + \mu_3^l = 1, l \in L.$$

В итоге формируется величина изменения функции полезности ресурсного обеспечения на  $t$ -м подпериоде планирования на уровне всего ПР ПО:

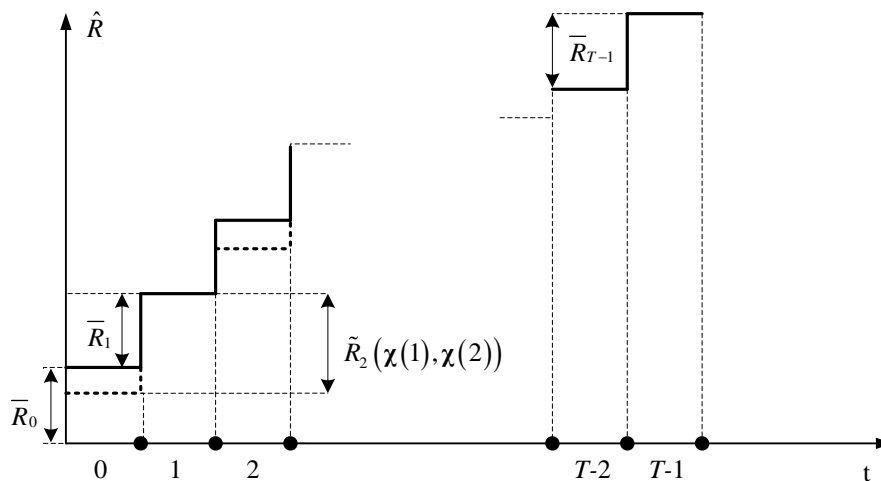


Рис. 1 – Наглядная интерпретация ограничения на финансы

$$\begin{aligned} & \Delta V_2^l(\chi(t-1), \chi(t)) = \\ & = \sum_{i \in L} \eta_2^l \Delta W_2^{lt} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), \quad t \in [1, T], \end{aligned}$$

где

$$\eta_2^l \geq 0, l \in L, \sum_{l \in L} \eta_2^l = 1.$$

Таким образом, аддитивная целевая функция модели среднесрочного планирования улучшения качества ПР ПО записывается следующим образом

$$F(\chi) = \sum_{t=1}^T \Phi_t(\chi(t-1), \chi(t)), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} & \Phi_t(\chi(t-1), \chi(t)) = \xi_t \sum_{\alpha=1}^2 \rho_\alpha \Delta V_\alpha^t(\chi(t-1), \chi(t)), \\ & \xi_t \geq 0, t \in [1, T], \sum_{t=1}^T \xi_t = 1; \rho_\alpha \geq 0, \alpha = 1, 2, \sum_{\alpha=1}^2 \rho_\alpha = 1. \end{aligned}$$

Перейдем к рассмотрению вопроса формирования ресурсного ограничения (ограничение на финансы) для целевой аддитивной функции (2). Будем считать, что на подпериоде  $t$  выделяются ресурсы в объеме  $\bar{R}_t$  и неиспользованные на  $t$ -м подпериоде финансы могут быть израсходованы на последующих подпериодах. Если считать, что на плановом периоде  $[0, T-1]$  любая практика ПР ПО может быть объектом вклада ресурсов, то финансовые затраты, используемые на  $(t-1)$ -м подпериоде определяются на основе следующего выражения

$$\tilde{R}_t(\chi(t-1), \chi(t)) =$$

$$= \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} \sum_{i \in I_k^l} R_{i2} \left( \{x_{is}^j(t-1)\}, \{x_{is}^j(t)\} \right), \quad t \in [1, T].$$

В результате ресурсное ограничение записывается следующим образом

$$\sum_{t=1}^{\tau} \tilde{R}_t(\chi(t-1), \chi(t)) \leq \sum_{t=0}^{\tau-1} \bar{R}_t = \hat{R}_{\tau-1}, \tau \in [1, T]. \quad (3)$$

При этом накладываются условия

$$\chi(t-1) \leq \chi(t), \chi(0) = \begin{Bmatrix} =j \\ x_{is} \end{Bmatrix},$$

$$\chi(T) = \begin{Bmatrix} -j \\ x_{is} \end{Bmatrix}, t \in [1, T],$$

где  $\begin{Bmatrix} =j \\ x_{is} \end{Bmatrix}$  и  $\begin{Bmatrix} -j \\ x_{is} \end{Bmatrix}$  – исходные состояния ПР ПО и целевой профайл. Наглядная интерпретация ограничения (3) приведена на рис. 1.

Таким образом, модель задачи среднесрочного планирования (динамическая постановка задачи) улучшения качества ПР ПО, которая базируется на теории полезности записывается следующим образом.

Найти оптимальное значение матрицы  $\chi = \chi^*$ , обеспечивающее максимальное значение аддитивной функции полезности (2) при условиях (1), (3), (4).

**Выводы.** В работе разработана модель задачи среднесрочного планирования улучшения качества ПР ПО на основе динамической постановки. Её решение позволяет определить целевой профайл для статической постановки задачи, решение которой уточняет план развития ПР ПО. На следующем этапе решается динамическая задача на подпериоде  $[2, T+1]$  для исходного состояния ПР ПО, определенного в ходе решения статической задачи и т.д. Целью дальнейших исследований является разработка информационной технологии скользящего планирования улучшения качества ПР ПО на основе задач текущего и среднесрочного планирования.

**Годлевский Михаил Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (050) 302-43-77; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Michael D. Godlevskiy** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the department of "Software Engineering and Management Information Technologies"; tel.: (050) 302-43-77; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Рубин Эдуард Ефимович** – кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности ректора Харьковского национального университета радиотехники; тел.: (050) 323-90-79; e-mail: e.rubin@telelsens.co.uk.

**Eduard U. Rubin** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, acting rector of Kharkiv National University of Radio Electronics; tel.: (050) 323-90-79; e-mail: e.rubin@telelsens.co.uk.

**Голоскокова Анна Александровна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (093) 123-50-90; e-mail: dsp\_17@bk.ru.

**Anna Goloskokova** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant of the department of "Software Engineering and Management Information Technologies"; tel.: (093) 123-50-90; e-mail: dsp\_17@bk.ru.

**Список литературы:** 1. Mutafelija B. Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards / B. Mutafelija. – Auerbach Pubs, 2009. – 406 p. 2. Chrissis M. B. CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement / M. B Chrissis, M. Konrad, S. Shrum. – Addison-Wesley, 2003. – 688 p. 3. Ahern D. M. CMMI Distilled: A Practical Introduction to Integrated Process Improvement, Third Edition / D. M. Ahern, A. Clouse, R. Turner. – Addison-Wesley, 2008. – 288 p. 4. Годлевский М. Д. Принципы моделирования оценки и управления качеством процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, В. А. Шеховцов, И. Л. Брагинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2012. – № 5/3 (59). – С. 45–49. 5. Годлевский М. Д. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости / М. Д. Годлевский, И. Л. Брагинский // Проблемы информационных технологий. – Херсон : ОЛДИ–Плюс, 2012. – С. 6–13. 6. Годлевский М. Д. Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, А. А. Голоскокова // Східно–Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 3/2 (75). – С. 23–29. 7. Овезгельдыев А. О. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации / А. О. Овезгельдыев, Э. Г. Петров, К. Э. Петров. – К. : Наукова думка, 2002. – 163 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mutafelija B., *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Auerbach Pubs, 2009. Print. 2. Chrissis M. B., M. Konrad, S. Shrum *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*. Addison-Wesley, 2003. Print. 3. Ahern D. M., A. Clouse, R. Turner *CMMI Distilled: A Practical Introduction to Integrated Process Improvement, Third Edition*. Addison-Wesley, 2008. Print. 4. Godlevskij, M. D., V. A. Shehovcov, and I. L. Braginskij "Principy modelirovaniya ocenki i upravleniya kachestvom processa razrabotki programmnoho obespecheniya." *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij* No. 5/3 (59) (2012): 45–49. Print. 5. Godlevskij, M. D., and I. L. Braginskij "Dinamicheskaja model' i algoritm upravleniya kachestvom processa razrabotki programmnyh sistem na osnove modeli zrelosti." *Problemy informacionnyh tehnologij*. Herson: OLDI-Pljus, 2012. 6–13. Print. 6. Godlevskij, M. D., and A. A. Goloskokova "Sintez staticheskix modelej planirovaniya uluchsheniya kachestva processa razrabotki programmnoho obespecheniya." *Shhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnologiy* No. 3/2 (75) (2015): 23–29. Print. 7. Ovezgel'dyev A. O., Je. G. Petrov, K. Je. Petrov *Sintez i identifikacija modelej mnogofaktornogo ocenivaniya i optimizacii*. Kiev: Naukova dumka, 2002. Print.

Поступила (received) 09.11.2015

M. V. TKACHUK, R. A. GAMZAEV, I. O. MARTINKUS, S. D. IANUSHKEVYCH

## METHODS AND TOOLS FOR DYNAMIC REQUIREMENTS CATALOG MANAGEMENT IN AGILE SOFTWARE DEVELOPMENT

A method for managing dynamic requirements catalog in agile software development, especially on example of Scrum-methodology is proposed. Popular approaches to solving this problem are reviewed. The proposed approach is based on the combined usage of the latent semantic analysis and analytical hierarchy process, it allows to evaluate the given textual software specification with respect to their possible redundancy and possible logical conflicts. Besides that this approach supports the decision making procedure to prioritize the requirements taking into account their functionality importance for target software product. The effectiveness of the proposed method was tested on the test case.

**Keywords:** Agile, latent semantic analysis, dynamic catalog of requirements analytic hierarchy process.

**Introduction: Problem Actuality and Research Goal.** Requirements management (RM) is one of the most important and weak-formalized disciplines in the modern software engineering (SE), because of permanent changes in an application business logic and /or in a projects configuration. This is the real challenge for any new software system to be designed “from scratch” or for already existing software systems. To resolve these problems the several adaptive SE-methodologies called as agile software development (ASD) are proposed [1]. The main concepts of any ASD-methodology supposed to meet requirement changes in a following way:

(1) organization of a permanent and closed collaboration between several actors involved in ASD: stakeholders, analysts, developers, end-users, etc.;

(2) usage of an iterative approach for the project development;

(3) providing a requirements traceability in order to reflect all requirement changes into appropriate projects artifacts.

In all ASD-methodologies, taking into account their base principles (1)–(3) is supposed, that the management of permanent changed in software requirement specifications (SRS) should be provided in an adaptive mode. It means necessity in appropriate way quickly to change the design solutions, development environment, the organization forms of a developer team, etc. Such dynamic and multidimensional vision for Requirements management is well shown on qualitative model of this process proposed by S. Ambler [2], which is shown below in Fig. 1.

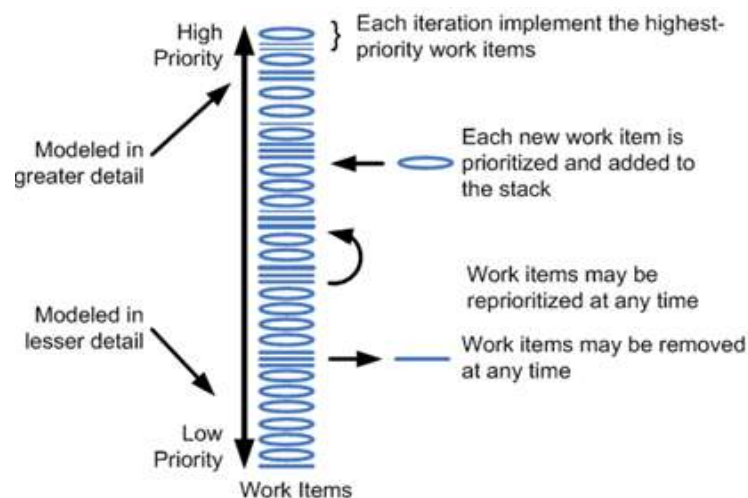


Figure 1 – Conceptual scheme for adaptive requirements management by S. Ambler [2]

It is necessary to note that besides some empirical recommendations concerning the problem how to build such a dynamic requirements catalog (DRC), in recent literature there are no more or less proved suggestions about possible quantitative effectiveness estimations for this purpose.

This problem is actual also in a broader sense, because DRC is a high-level requirements representation for any domain, independently from their specification method with any notation (UML, IDEF0 etc.). So DRC is essentially an example of such important concept in Agile methods as initial requirements[3], which are required for

building on their base Domain Model, which in turn is basis for such modern and effective software development approach as **Domain Driven Development (DDD)** [4]. But in [3] don't proposed any quantitative methods and evaluations as for priority determination of particular requirements, as well as solving of such important tasks, as the elimination of logical contradictions and data duplications in text specifications.

That is why the main research aim of this paper is to consider some specific features of requirements management in ASD, to analyze available formal methods for requirements evaluation and prioritization, and to

propose the complex of algorithms and software tools, which can be used for DRC processing.

**Specific features of requirements management in Agile-software development on Scrum-methodology example.** As already mentioned above, ASD methodologies are widely used due to new nature of software projects and due to permanent changes in the SRS. ASD implies refusal from a huge of project documentation, but really needs support for automated of stakeholders knowledge processing, in order to reduce the time for adaptation to requirements changes and to minimize risks related to them.

Exactly because of these reasons in the modern SE-concepts process control methods called also as “software cybernetics” (e.g. in [5]) are used. On Fig. 2 the

cybernetics-centered scheme is shown [6], which represent one of the most used ASD-methodology, namely Scrum method [1, 2]. There are 2 feedback loops included in this control scheme: (1) daily process control loop, which is organized basing on sprint backlog (SB) and using some source code quality metrics, (2) iteration process control loop, which is provided basing on product backlog (PB) and using some requirements quality metrics. The SB and PB both collect the selected requirements to be met in final software product. In the control loop (1) usually some IDE, e.g. the Eclipse is used by developers team, while in the control loop (2) an appropriate requirements management system (RMS) can be exploited by stakeholders (or Product owner – in Scrum project) and by domain analysts.

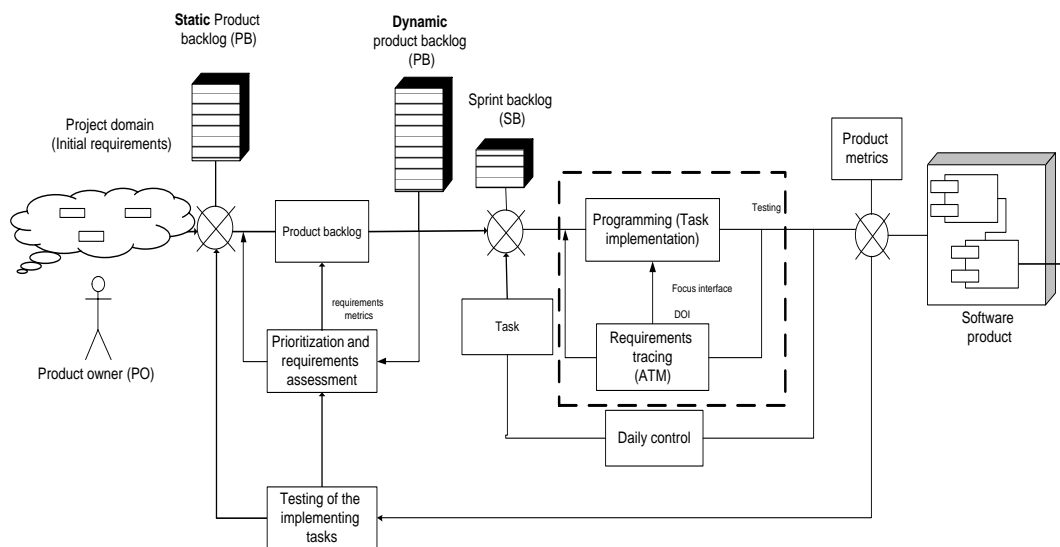


Figure 2 – The cybernetic-centered scheme of a Scrum-methodology

In [6] the approach to creation so-called advanced traceability matrix is elaborated, which allows to take into account all developers activities in time-oriented data model, and the appropriate CASE-tool designed to combine the features of typical RMS and the functionality of integrated development environments (e.g. Eclipse). But the problem how to form and to maintenance an appropriate DRC is still open, and below we propose methods and software tools for this problem solution.

**Overview of the text specifications analysis and prioritization methods for the composition of the dynamic catalog of requirements.** Current approaches to the treatment of software requirements formulated in natural language can be divided into 3 main groups:

1. The construction of formal models for the original text descriptions of requirements, using the algebraic notation or the apparatus of predicate logic ([7]), for subsequent qualitative analysis and automatic verification;
2. Development and application of different methods for building automated visual, structural and graphical forms of presentation of software requirements: e.g. in the form of ER-diagrams and UML-diagrams, based on their initial descriptions of natural language etc., this group includes many works such as [8];

3. Various methods of logical and linguistic analysis of the semantic features of natural language texts of specifications that are used to extract hidden knowledge, establish semantic dependencies, eliminate logical contradictions, etc. [9].

Obviously, considering the properties of agile software development in general, and the scheme of the Scrum-project in particular, out of the above methods for processing requirements text descriptions, in the context of this work the methods of the third group should be considered, as no formal requirements specification (covered by the Group 1 methods), or their diagrammatic documentation (covered by Group 2 methods) constitute essential prerequisites (conditions) for the successful implementation of agile-projects [10–11].

In the selected group of methods for processing text requirements, taking into account the specific tasks in the control loop of the process of forming the dynamic catalog of requirements DRC, for the solution of the first of them – namely, for eliminating possible logical inconsistencies and redundancy (duplication) of data – different data mining methods [12], the methods of the analysis of hypertext links [13], and the various modifications of the method of latent semantic analysis (LSA) [14] can be effectively applied.



The LSA method is a statistical method for processing natural language texts, the purpose of which is to establish the relationships between documents that are the part of a collection (case), and a set of some terms contained in these documents. It is possible to identify the thematic proximity of certain terms, which can then be used to calculate statistical estimates of the thematic proximity of the entire documents. As the input data the LSA method uses so-called "term-to-documents" matrix ("term" refers to a specific lexical unit), which reflects the frequency of occurrence of the particular term in the text of the particular document. Each column of the matrix refers to the certain document, and each line – to the certain term. Various approaches (metrics) are used for defining the value of a certain matrix element on the intersection of the  $i$ -th row and  $j$ -th column. One of such metrics is so-called TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency) – the metrics which is used for the estimation of the importance of the term for the certain document from a collection [15]. To solve the second problem of the initial processing of the text description of requirements in the control loop of forming the dynamic catalog – namely, to prioritize the requirements, we first should take into account some methodological features of this process in the context of the agile methodologies of software development. It should be noted that in many works concerning the characteristics of the requirements engineering in agile methodologies it is directly stated that the creation and use of the appropriate mechanisms for prioritization and reprioritization of requirements is a key factor in the success of the projects making use of the agile methodologies. At the same time, in the agile projects (XP, Scrum, ASD), there are characteristic differences from the traditional methodologies (cascade, spiral, etc.) in the requirement prioritization process (RPP), these differences are analyzed in detail in [15], and are summarized in table.1.

Table 1 – The characteristic properties of RPP in the agile methodologies [15]

RPP characteristics	Traditional methodologies	Agile methodologies
When RPP is carried out	As a rule, once, after the analysis stage and before the implementation stage	Before each design iteration, or even during the iteration
Who initializes / leads RPP	Software developers, with the assistance of the manager of the project and other stakeholders	The software customer with the help of the manager of the agile development group (Scrum master)
Goals / prerequisites of carrying out RPP	The control for the process of carrying out the project	Support of the max. business significance of the results of software development / more precise specification of the amount of works of the current iteration of the project

The presence of all these factors leads to the fact that for RPP various expert methods are generally used, a fairly complete overview of which is given in [15]. Among them the following methods can be considered:

1. The method of the direct pairwise analysis – is carried out by pairwise comparing of separate requirements until the requirement with the highest priority appears at peak of their initiating list; owing to it this approach is applicable only in projects with a small amount of well-structured and plain text descriptions of requirements;
2. Wiegers matrix approach – is based on representing the set of software functional requirements in the form of the special table (matrix), the elements of which represent estimations, and are directly proportional to their technical significance for the final software products and inversely proportional to the cost and possible risks of their implementation; as a result of the analysis of such matrix it is possible to select the requirements with a maximum priority taking into account a compromise choice based on the values of the corresponding elements of this matrix;
3. The method of creation of a binary search tree – represents the approach based on a well-known method of binary search from the area of information search which can be adapted to the tasks of the prioritization of requirements, as a result of it the initial list of requirements can be represented in a way when the requirements with maximal and minimal priorities will be positioned in the ordered list.

Among the other methods it is important to mention the analytic hierarchy process [16]. This method will be used in this paper to prioritize DRC requirements after LSA preprocessing.

**The complex procedure for constructing the dynamic requirements catalogue.** The corresponding algorithms implementing its separate stages are given in more details below.

**LSA requirements processing algorithm.**

Step 1: Forming the matrix of the occurrence frequency for the  $i$ -th term in  $j$ -th requirements text:

$$M[x_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where  $x_{ij}$  – is the occurrence frequency of the  $i$ -th term in the  $j$ -th requirement text.

Step 2: Removal of the columns in the matrix  $M[x_{ij}]$  where the term is included in only one requirement, resulting in reduced matrix  $M^i[x_{ij}]$  with dimensions  $m \times n$ .

Step 3: Creating the reduced matrix  $M^i[x_{ij}]$  by means of a method of singular expansion [11], i.e. to present a matrix in a type:

$$M' = U W V^T, \quad (2)$$

where  $U$  and  $V$  are the orthogonal matrixes.

Step 4. By selecting  $k$  largest singular values  $w_j$ , the approximation of an initial matrix by the matrix of the smaller rank  $k$  can be made. Performing the procedure of the rank reduction allows to eliminate surplus information, the rank value  $k$  is defined heuristically [13]. Matrixes are displayed as follows:

$$W' = \begin{bmatrix} w_1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & w_j & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & w_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$U' = [[u_1] \dots [u_k]], \quad (4)$$

$$V' = \begin{bmatrix} [v_1] \\ \dots \\ [v_k] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Step 5: Obtaining the final matrix  $A$  with the frequencies of the occurrence of  $i$ -th term in  $j$ -th requirements description that contains only  $k$  first linearly independent elements:

$$A = U' W' V'^T. \quad (6)$$

In contrast to the original matrix  $M$ , the resulting matrix  $A$  is not sparse [13], which allows calculating dependencies between requirements documents even if the documents have no common terms.

Step 6: For finding dependencies between texts of different requirements on the basis of the obtained matrix  $A$  it is necessary to calculate the Piersons correlation [17] between requirements documents:

$$R = [r_{ij}], \text{ for } \forall i > j, i, j = \overline{1, n} \text{ and } r_{ij} = 1 \text{ if } i = j.$$

As a result of the given step the triangular matrix  $R$  containing correlations coefficients is obtained:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & r_{xy} & \dots & 1 & 0 \\ r_{1n} & \dots & r_{xn} & \dots & r_{mn-1} & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

The values of the correlation coefficients  $r_{xy}$  between two documents  $x$  and  $y$  are calculated on the basis of the data received in 8. Denoting pairwise the compared columns of matrix  $A$  as vectors  $x = \{x_i\}$  and  $y = \{y_i\}$ , we receive:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad r_{xy} \in [-1; 1] \quad (8)$$

where:  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $\bar{x}, \bar{y}$  – average value of

$$\text{samples } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ and } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}.$$

Step 7: Determining the critical value of the Pearson correlation coefficient  $r_{cr}$  for a given level of significance. Here the positive value of correlation coefficients between the requirement  $x$  and  $y$ ,  $r_{xy} > r_{cr}$  which exceeds the positive critical value  $r_{cr} > 0$ , means the existence of the contradiction in the description of these requirements. The negative value of the correlation coefficients between the requirement  $x$  and  $y$ ,  $r_{xy} < -r_{cr}$  means that these requirements have redundancy in their description, and one of the requirements can be removed.

As a result of the execution of this algorithm (possibly, in multiple iterations) it is possible to determine all requirements whose descriptions contain logical contradictions and overlapping texts.

#### AHP-based requirements processing algorithm.

1 stage: generate criteria which will be used for an estimation of the requirements importance.

2 stage: generate a matrix of pairwise comparison of the importance criteria, we denote it as  $M[x_{ij}]$  with dimensions  $m \times m$ , where  $m$  is the number of criteria. As an estimation of the importance measure we will use score estimations. The resulting matrix by definition should possess the following properties:

All diagonal elements are equal to 1

All remaining elements possess the property of reverse symmetry, i.e. the values of matrix elements symmetric to the main diagonal are reverse values [16].

3 stage: to generate  $m$  reverse-semantic matrixes with dimensions  $n \times n$  where  $m$  – the number of criteria,  $n$  – the number of requirements. The matrixes' values are estimations of pairwise importance of each requirement for each criterion:

$$A_k = [a_{ij}], \quad k = \overline{1, m}; \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

4 stage: For  $M$  and  $A_k$  matrixes obtained at the previous steps calculate local priorities of criteria by the formulas (10) and (11) respectively:

$$L_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}, \quad i = \overline{1, n} \quad (10)$$

$$AL_i^k = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}^k}, \quad i = \overline{1, n} \quad (11)$$

where  $x_{ij}$  – an element of matrix  $M$ ;

$a_{ij}^k$  – elements of a matrix  $A_k$  ;

$\prod_{j=1}^n x_{ij}$  and  $\prod_{j=1}^n a_{ij}^k$  – product of all elements in  $i$ -th

line.

5 stage: For  $L_i$  and  $AL_i^k$  values obtained at the 4th step carry out the normalization of the local priority criteria for all pairwise comparisons, for this purpose it is necessary to calculate local priorities of criteria by the formula (12):

$$L_i = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$AL_i^k = \frac{a_{ij}^k}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^k}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (13)$$

On the base of the normalized calculated values it is possible to form matrixes  $L$  and  $AL$ :

$$L = \|l_i\|, \quad i = \overline{1, m} \quad (14)$$

$$AL = \|AL_j^k\|, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (15)$$

6 stage: calculate global priorities, as matrix products – the formula (16):

$$G_j = AL \times L, \quad j = \overline{1, n}. \quad (16)$$

The matrix  $G_j = \{w_1, \dots, w_n\}$  contains coefficients defining requirements priorities.

As a result, by means of AHP algorithm the weight coefficients defining the importance of the requirements based on the selected criteria have been obtained.

**The instrumental complex for implementing the procedure of constructing the dynamic requirements catalogue and the test calculations results.** As the frequency of solving the task of constructing and modifying the dynamic requirements catalogue is not real-time, but assumes the possibility of performing the analysis and the formation of such requirements set synchronously with the planning of the next iteration of the agile-project, i.e. in case of Scrum-methodology its execution frequency corresponds to the period of 2-4 weeks, for the implementation of the corresponding procedure it is possible to use already existing software tools, such as MS Excel from the MS Open Office [18] tool suite and Matlab math package [19].

The input data in this schema are unprocessed initial requirements to the developed software product. Requirements are received from the product owner who forms the list of requirements and highlights keywords for each requirement. The developed application allows to form an occurrence matrix of keywords which forms the basis for calculation of correlation coefficients between requirements. The MatLab environment is used for this purpose, the data is imported from Excel file into this environment.

For carrying out the numerical experiment the table of requirements and the highlighted keywords has been made, see table 2.

Table 2 – The list of requirements and keywords from the terms dictionary

№	The requirement (the initial text)	Keywords	Id.
1	«The automated calculation system (ACC) should be expected to be used for processing the data about corporate customers, physical persons, legal bodies».	«The automated calculation system», "customers", "physical persons", "legal bodies".	r1
2	“The capability of working with groups of clients, supporting functions" friends "and" family "and the cost-based user groups that are grouped based on arbitrary attributes, adding / removing subscribers in a group as the operator and authorized person	"Customer", "add/remove", "subscribers".	r2
3	«Creating complex tariff plans with the participation of services that belong to different personal accounts».	"Tariff plan", "Personal account".	r3
4	«Convenience of tariff plans creation, a visual programming environment».	"Tariff plan", "Programming environment".	r4
5	«Formation of the new, modification and removal of existing tariff plans by ACC operator».	"Tariff plan", "modification", "removal".	r5
6	«Explicit representation of tariff plans in automated ACC workplace for different types of ACC users».	"Tariff plan", "Types of users".	r6
7	«Creation of tariff plans of arbitrary complexity (including in the TP an unlimited number of tariff zones)».	"Tariff plan", "Tariff zone".	r7

The calculation final results of Pierson mutual correlation are shown in table 3. For a significance level  $r_{cr} = 0,874$  values that have the correlation above critical, are of interest for the further analysis. As correlation between  $r1$  and  $r6$ ,  $r3$  and  $r4$ ,  $r3$  and  $r7$  is above critical value these requirements have been analyzed and the conclusion was made about the data redundancy in their

description. So the requirements  $r4$ ,  $r6$  and  $r7$  have been excluded from the log of requirements. After this, for each criterion, the pairwise comparison of the requirements importance has been performed, their local priorities, and the normalized priorities have been calculated, and then the generalized global priority has been calculated. The results are shown in table 4.

Table 3 – Pierson correlation

r1	1					
r2	-0,423	1				
r3	0,362	0,430	1			
r4	0,362	0,430	0,897	1		
r5	0,507	0,557	0,640	0,640	1	
r6	0,936	-0,092	0,485	0,485	0,774	1
r7	0,362	0,430	0,919	0,904	0,640	0,485

Table 4 – Result of LSA application

	Criteria priorities	r1	r2	r3	r4
Importance for the customer	0,615	0,263	0,203	0,267	0,267
Development time	0,292	0,311	0,311	0,198	0,180
Development complexity	0,093	0,266	0,263	0,276	0,195
The generalized priority		0,277	0,240	0,248	0,235

As a results of calculation we formed table 5 which contains requirements in decreasing order of their priority. Thus, as a result of applying LSA and AHP methods with

a complex procedure proposed earlier (fig. 2 in the previous section of this paper) the dynamic catalogue of requirements is formed, the requirements are then transferred then into adaptive tracing control loop.

**Conclusions and Future Work.** In this paper some existing approaches to requirements assessment and prioritization were analyzed, and the appropriate methods and software tools were developed to management dynamic requirements catalog (DRC) management in agile software development, especially on example of Scrum-methodology. The proposed approach is based on the combined usage of the latent semantic analysis and analytical hierarchy process, was allows to evaluate the given textual software specification with respect to their possible redundancy and possible logical conflicts. Besides that this approach supports the decision making procedure to prioritize the requirements taking into account their functionality importance for target software product. Our future work concerns final implementation of the proposed CASE-tool, as well as improving the algorithms for DRC management using other experts estimation methods in order to make its more precise and efficient.

Table 5 – Method AHP results

№	The requirement (the initial text)	Keywords	Id.
1	«The automated calculation system (ACC) should be expected to be used for processing the data about corporate customers, physical persons, legal bodies».	«The automated calculation system», "customers", "physical persons", "legal bodies".	r1
2	«Creating complex tariff plans with the participation of services that belong to different personal accounts».	"Tariff plan", "Personal account".	r3
3	“The capability of working with groups of clients, supporting functions” friends “and” family “and the cost-based user groups that are grouped based on arbitrary attributes, adding / removing subscribers in a group as the operator and authorized person	"Customer", "add/remove", "subscribers".	r2
4	«Formation of the new, modification and removal of existing tariff plans by ACC operator».	"Tariff plan", "modification", "removal".	r5

**Bibliography:** 1. Anderson D. J. Agile Management for Software Engineering / D.J. Anderson // Prentice Hall, 2003. – 336 p. 2. Ambler S. Agile Architecture: Strategies for Scaling Agile Software Development / S. Ambler // Web <http://agilemodeling.com/essays/agileArchitecture.htm> 3. Ambler S. Agile/Evolutionary Data Modeling: From Domain Modeling to Physical Modeling / S. Ambler // Web <http://agiledata.org/essays/agileDataModeling.html#DisasterStrikes> 4. Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software / E. Evans. – Addison-Wesley. – 2003. – 359 p. // 5. Hong Xu. Requirement process establishment and improvement from the viewpoint of cybernetics / Hong Xu, Pete Sawyer, Ian Sommerville. // The Journal of Systems and Software, issue. – 2006. – № 79. – P. 1504–1513. 6. Tkachuk M. V. Models and Tools for Effectiveness Increasing of Requirements Traceability in Agile Software Development / M. V. Tkachuk, R. O. Gamzayev, H. C. Mayr, V. O. Bolshutkin // Проблеми програмування. – К.: НАН України. – 2012. – № 2–3 (спец. випуск). – С. 252–260. 7. Селяков Е. Б. Методика выбора требований при проектировании АСУТП на основе логико-формальной модели системы требований / Е. Б. Селяков // Вісник Донецького національного університету, Сер. А: Природничі науки. – 2009. – вип. 1. – С. 472–477. 8. Kop C. An Interlingua based Approach to Derive State Charts from Natural Language Requirements In: Hamza M.H. (Hrsg.) / C. Kop, H. C. Mayr // Proceedings of the 7th IASTED Anaheim, Calgary, Zurich: Acta Press, – 2003. – P. 538 – 543. 9. Ilieva M., Representing Textual Requirements as Graphical Natural Language for UML-diagram Generation / M. Ilieva, H. Boley // Proceedings of the Twentieth International Conference on Software

Engineering & Knowledge Engineering, San Francisco, CA. – 2008. – P. 478 – 483 10. Highsmith J. Agile Project Management. / Highsmith J. – Addison-Wesley – 2004. – 277 p. 11. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений / Фаулер М.; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 404 с. 12. Olson L. Advanced Data Mining Techniques/ Olson L., Delen D.– Berlin: Springer-Verlag. . – 2008. – 180 p. 13. Ланде Д. В. Основы интеграции информационных потоков. / Ланде Д. В. – К. Инжиниринг, 2006. – 240 с. 14. Антонова А. А. Применение латентно-семантического анализа при кластеризации слов на основании их контекстов / А. А. Антонова, Е. А. Ильюшина, А. В. Прохоров // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». – М.: Изд-во МГУ, 2007. – С. 23–24. 15. Racheva Z. Supporting the Dynamic Reprioritization of Requirements in Agile Development of Software Products / Z. Racheva, M. Daneva, L. Buglione, // 2nd International Workshop on Software Product Management, – 2008. – P. 49–58. 16. Саати Т. Принятие решений – метод анализа иерархий / Саати Т. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с. 17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. / Вентцель Е. С., Овчарова Л. А. – М: Наука, 1988. – 480 с. 18. Matlab – Web <http://www.mathworks.com> 19. Open Office . – Web [http://wiki.openoffice.org/wiki/Documentation/OOoAuthors\\_User\\_Manual/Migration\\_Guide/Calc\\_and\\_Excel](http://wiki.openoffice.org/wiki/Documentation/OOoAuthors_User_Manual/Migration_Guide/Calc_and_Excel)

**Bibliography (transliterated):** 1. Anderson D.J. Agile Management for Software Engineering. D.J. Anderson. Prentice Hall, 2003. 336 p. Print 2. Ambler S. Agile Architecture: Strategies for Scaling Agile Software

- Development. S. Ambler  
<http://agilemodeling.com/essays/agileArchitecture.htm> 3. Ambler S. Agile/Evolutionary Data Modeling: From Domain Modeling to Physical Modeling S. Ambler.  
<http://agiledata.org/essays/agileDataModeling.html#DisasterStrikes>
4. Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Evans E. Addison-Wesley, 2003. 359. Print. 5. Hong Xu. "Requirement process establishment and improvement from the viewpoint of cybernetics". Hong Xu, Pete Sawyer, Ian Sommerville. The Journal of Systems and Software, issue 79 (2006): 1504–1513. Print. 6. Tkachuk M.V. "Models and Tools for Effectiveness Increasing of Requirements Traceability in Agile Software Development". M.V. Tkachuk, R.O. Gamzayev, H.C. Mayr, V.O. Bolshutkin. Problemy programirovaniya. K.: NAN Ukraine. 2012. № 2–3 (spec. vypusk). 252–260. Print. 7. Seljakov E.B. "Metodika vybora trebovanij pri proektirovanii ASUTP na osnove logiko-formal'noj modeli sistemy trebovanij." E.B. Seljakov. Visnik Donec'kogo nacional'nogo universitetu, Ser. A: Nature Science. 2009. vol. 1. 472–477. Print. 8. Kop C. "An Interlingua based Approach to Derive State Charts form Natural Language Requirements" In: Hamza M.H. (Hrsg.). C. Kop, H.C. Mayr. Proceedings of the 7th IASTED Anaheim, Calgary, Zurich: Acta Press, 2003. 538–543. Print. 9. Ilieva M., "Representing Textual Requirements as Graphical Natural Language for UML-diagram Generation." M. Ilieva, H. Boley. Proceedings of the Twentieth International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering, San Francisco, CA. 2008. 478–483. Print. 10. Highsmith J. Agile Project Management. Highsmith J. Addison-Wesley, 2004. 277. Print. 11. Fauler M. Arhitektura korporativnyh programmnyh prilozhenij. Fauler M.; per. s angl. M.: Vil'jams, 2006. 404. Print. 12. Olson L. "Advanced Data Mining Techniques." Olson L., Delen D. Berlin: Springer-Verlag. 2008. 180. Print. 13. Lande D.V. 1. Anderson D.J. Agile Management for Software Engineering D.J. Anderson. Prentice Hall, 2006. 240. Print. 14. Antonova A.A. "Primenenie latentno-semanticeskogo analiza pri klasterizacii slov na osnovanii ih kontekstov." A.A. Antonova, E.A. Il'jushina, A.V. Prohorov. Tezisy dokladov nauchnoj konferencii "Lomonosovskie chteniya". M.: Izd-vo MGU, 2007. 23–24. Print. 15. Racheva Z. "Supporting the Dynamic Reprioritization of Requirements in Agile Development of Software Products" Z. Racheva, M. Daneva, L. Buglione, 2nd International Workshop on Software Product Management, 2008. 49–58. Print. 16. Saati T. Prinjatje reshenij – metod analiza ierarhij. Saati T. M.: Radio and connexion, 1993. 278 p. Print. 17. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej i ee inzhenernye prilozhenija. Ventcel' E.S., Ovcharova L.A. M.: Science, 1988. 480. Print. 18. Matlab. MathWorks. Matlab, 2015 Web 13 June 2015 <<http://www.mathworks.com>> 19. Open Office. Differences in Use between Calc and Excel, OpenOffice, 2013 Web Web 13 June 2015 <[http://wiki.openoffice.org/wiki/Documentation/OOoAuthors\\_User\\_Manual/Migration\\_Guide/Calc\\_and\\_Excel](http://wiki.openoffice.org/wiki/Documentation/OOoAuthors_User_Manual/Migration_Guide/Calc_and_Excel)>

Received 12.10.2015

**Ткачук Миколай В'ячеславович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) 7076-086; e-mail: [tka@kpi.kharkov.ua](mailto:tka@kpi.kharkov.ua)

**Tkachuk Mykoli Vyacheslavovich** – Doctor of techn. science, Prof., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", phone.: (057) 7076-086; e-mail: [tka@kpi.kharkov.ua](mailto:tka@kpi.kharkov.ua)

**Гамзаєв Рустам Олександрович** – канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) 7076-086; e-mail: [rustam.gamzaev@gmail.com](mailto:rustam.gamzaev@gmail.com)

**Gamzaev Rustam Alexander** – PhD, Asc. Prof., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute e-mail: [rustam.gamzaev@gmail.com](mailto:rustam.gamzaev@gmail.com)

**Мартінкус Ірина Олегівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент; тел.: (057) 7076-086; e-mail: [imartinkus@gmail.com](mailto:imartinkus@gmail.com)

**Martinkus Iryna Olegivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant; tel.: (057) 7076-086; e-mail: [imartinkus@gmail.com](mailto:imartinkus@gmail.com)

**Янушкевич Сергій Дмитрович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (050) 741-50-15; e-mail: [ianushkevych.sergii@yangex.ua](mailto:ianushkevych.sergii@yangex.ua)

**Ianushkevych Sergii Dmytrovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (050) 741-50-15; e-mail: [ianushkevych.sergii@yangex.ua](mailto:ianushkevych.sergii@yangex.ua)

С. В. ПЕТРАСОВА, Н. Ф. ХАЙРОВА

## ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕМАНТИЧЕСКИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ КОЛЛОКАЦИЙ

Предлагается логико-лингвистическая модель идентификации семантически близких коллокаций. Для автоматического определения семантической корреляции эквивалентности между коллокатами использован метод компонентного анализа. В предлагаемой модели для формализации семантически близких коллокаций определено множество семантико-грамматических характеристик коллокатов, отношения между которыми описаны с использованием базового аппарата алгебры предикатов. Сделаны выводы о необходимости учета как синтаксической, так и семантической информации о лексических единицах, что позволит повысить эффективность семантической обработки текстов.

**Ключевые слова:** семантически близкие коллокации, корреляция эквивалентности, коллокаты, метод компонентного анализа, семантико-грамматические характеристики, аппарат алгебры предикатов.

**Введение.** Семантический анализ текста – одно из самых динамично развивающихся и в то же время наиболее сложно реализуемых направлений в сфере Natural language processing (NLP). Сложность семантической обработки естественно-языковых источников, в первую очередь, определяется многозначностью и синонимичностью, присущими языку на всех уровнях его представления (морфологическом, синтаксическом, семантическом и прагматическом), что, прежде всего, проявляется в проблеме определения семантической эквивалентности языковых единиц. При этом сложность задачи повышается экспоненциально, если рассматривается смысловая близость не слов, а многословных словосочетаний.

Для установления смысловой эквивалентности словосочетаний предлагается логико-лингвистическая модель определения семантической близости. Применение данной модели позволяет автоматизировать определение семантической близости двухсловных коллокаций. Для идентификации коллокаций предлагается учитывать как морфологические и синтаксические, так и семантические характеристики исследуемых лексических единиц.

Под коллокацией в данном исследовании мы определяем комбинацию двух лексических единиц, имеющих тенденцию к совместной не случайной встречаемости в тексте.

**Актуальность исследования.** Семантические эквиваленты можно определить как слова с близким значением, встречающиеся в одном контексте (т.е. слова с совпадающим денотатом и различными сигнификатами). Таким образом, с помощью семантических эквивалентов осуществляется кодирование одного и того же содержания разными формальными средствами.

Понятие семантической эквивалентности (близости) неразрывно связано с контекстом. Так при определении близких по смыслу отдельных лексем (семантических эквивалентов) необходимо учитывать принадлежность их значений к одной и той же предметной или понятийной области. Тогда как, при определении семантической близости коллокаций или словосочетаний необходимо устанавливать семантическую близость конкретных смыслов коллокаций полностью, а не лексем, из которых состоят слово-

сочетания, со всей их индивидуальной многозначностью.

Существующие методы определения коллокаций можно разделить на две группы. К первой группе методов относятся статистические методы (window-based, меры ассоциации MI, PMI, t-scores, Chi-squared распределение), основанные на измерении частоты совместной встречаемости коллокатов. Вторая группа – методы, основанные на анализе синтаксической структуры коллокаций, в результате которого генерируется список коллокатов.

Методы "window-based" основаны на модели линейного порядка слов, в которых кандидаты коллокации (коллокаты) извлекаются из "окна" фиксированного размера [1]. Меры MI (Mutual information) и PMI (Pointwise mutual information) позволяют определить, насколько значимой является встречаемость двух слов на основе сравнения частоты совместного появления двух слов и произведением частот их независимого появления в тексте [2]. Мера t-score учитывает частоту совместной встречаемости ключевого слова и его коллоката. Слова с наибольшим значением t-score оказываются частотными, поэтому необходимо задавать список стоп-слов, чтобы отбросить самые частотные слова. В Chi-squared распределении используется  $\chi^2$ -критерий Пирсона для анализа таблиц сопряженности. Значения, формирующие таблицу:

- частота данной коллокации,
- частота коллокаций с участием первого слова (но не второго),
- частота коллокаций с участием второго слова (но не первого),
- частота всех остальных коллокаций [3].

Статистические методы, как правило, извлекают дополнительные шумные данные и игнорируют синтаксические связи между словами на длинных расстояниях.

Использование методов, основанных на анализе синтаксической структуры, позволяет отфильтровать ложные коллокаты, а также получить доступ к коллокатам, находящимся на длинном расстоянии друг от друга. Следует отметить, что такое увеличение точности достигается за счет тщательного описания всех синтаксических конструкций, в которых могут возникнуть два коллоката [4].

К настоящему моменту ни первая, ни вторая группа методов не позволяют выявлять эквивалентность словосочетаний с достаточно высокой полнотой. Анализ показывает, что определение коллокаций в текстах требует, в дополнение к семантико-синтаксическим средствам анализа, использования моделей когнитивной деятельности человека. В этом случае идентификация семантически близких коллокаций позволяет не только учитывать многозначность единиц языка, но и формализовать семантические корреляции, в частности, семантическую эквивалентность.

**Постановка задачи исследования.** Языковая деятельность человека характеризуется двумя основными классами когнитивных средств: языковыми и прагматическими. Первый класс – это знания, закрепленные в семантике языка; второй обеспечивается использованием неязыковых знаний в сочетании с языковыми [5], наличием пресуппозиции – необходимого семантического компонента, обеспечивающего существование смысла в утверждении. В связи с чем ни одна из задач, связанных с автоматической обработкой текста, не может быть решена исключительно на морфологическом и/или синтаксическом анализе, а требует более сложного (семантического) уровня обработки.

Цель данной работы – разработка логико-лингвистической модели идентификации семантически близких коллокаций на основе использования методов компонентного анализа, с использованием базового аппарата алгебры конечных предикатов.

Основная идея данного подхода заключается в том, что обладающие семантическими корреляциями коллокаты имеют определенную общность содержания, выражающую сходство обозначаемых явлений или понятий [6].

**Пример выявления семантически эквивалентных коллокаций.** На первом этапе семантической обработки текста должны быть выделены лексические семантические эквиваленты. Для этого используется метод компонентного анализа, основанный на использовании знаний глоссария [7].

Двухсловные словосочетания (коллокации), образованные попарно семантически близкими коллокатами, могут быть как семантически близкими, так и семантически не близкими, имеющими очень маленькую смысловую общность. Примеры семантически близких словосочетаний показаны на рис. 1, это пары – *контент ресурсу*  $\approx$  *зміст джерела*; *об'єднання споживачів*  $\approx$  *асоціація користувачів*; *часовий інтервал*  $\approx$  *проміжок часу*; *зберігати дані*  $\approx$  *тримати позначки*.

К семантически не близким словосочетаниям, составленным из семантически близких слов можно отнести: *виділятися форматом*  $\neq$  *позначати розмір*; *гуртування стандартами*  $\neq$  *поєднання шаблонів*; *оснащений кабелем*  $\neq$  *забезпечення дроту* (рис. 2).

Предлагается логико-лингвистическая модель, позволяющая формально определить семантическую эквивалентность двухсловных словосочетаний за счет

отношений семантико-грамматических признаков главных и зависимых коллокатов в субстантивной, адъективной и глагольной коллокациях.



Рис. 1 – Семантически эквивалентные коллокации

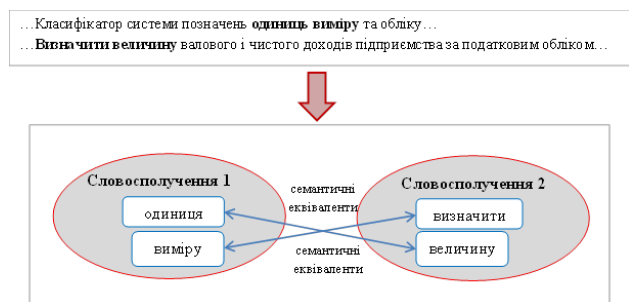


Рис. 2 – Семантически не эквивалентные коллокации

**Описание модели идентификации семантической эквивалентности коллокаций.** Рассмотрим множество словоформ, образующих словосочетание  $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ , где  $n$  – количество словоформ в слове системы. Образующие коллокации, словоформы из множества  $M$  устанавливают семантико-синтаксические связи, которые можно выразить формально, используя базовые средства алгебры конечных предикатов, позволяющие идентифицировать лингвистические объекты.

Семантико-грамматические отношения двухсловных коллокаций можно представить в виде предиката  $P(x, y)$ , где  $x, y \in M$ , при этом  $x$  – главное слово словосочетания, а  $y$  – зависимое слово словосочетания. Предикат  $P(x, y) = 1$  в том случае, если сочетание семантико-грамматической информации двух рядом стоящих словоформ образует коллокацию, и  $P(x, y) = 0$ , в противном случае.

Для формального определения коллокаций выделены и описаны следующие грамматические и семантические характеристики коллокатов словосочетаний:

$$\begin{aligned}
 & a^{NNom} \vee a^{NGen} \vee a^{NAcc} \vee a^{NDat} \vee a^{Nln} \vee a^{NPr} \vee a^{VRef} \vee \\
 & \vee a^{VVonRef} \vee a^{ANom} \vee a^{AGen} \vee a^{AAcc} \vee a^{ADat} \vee a^{AIn} \vee a^{APr} = 1; \quad (1) \\
 & c^{Ag} \vee c^{Att} \vee c^{Pac} \vee c^{Adr} \vee c^{Ins} \vee c^M = 1,
 \end{aligned}$$

где использованы предметные переменные, характеризующие грамматические категории:  $a^{NNom}$  – существительное в именительном падеже,  $a^{NGen}$  – существ-

вительное в родительном падеже,  $a^{NAcc}$  – существительное в винительном падеже,  $a^{NDat}$  – существительное в дательном падеже,  $a^{Nln}$  – существительное в творительном падеже,  $a^{NPr}$  – существительное в предложном падеже,  $a^{ANom}$  – прилагательное в именительном падеже,  $a^{AGen}$  – прилагательное в родительном падеже,  $a^{AAcc}$  – прилагательное в винительном падеже,  $a^{ADat}$  – прилагательное в дательном падеже,  $a^{Aln}$  – прилагательное в творительном падеже,  $a^{APr}$  – прилагательное в предложном падеже,  $a^{VRef}$  – глагол возвратный,  $a^{VNonRef}$  – глагол невозвратный; и семантические категории:  $c^{Ag}$  – агенс,  $c^{Att}$  – атрибут,  $c^{Pac}$  – пациенс,  $c^{Adr}$  – адресат,  $c^{Ins}$  – инструмент,  $c^M$  – содержание.

Введенный на множестве словоформ  $M$  предикат  $P(x)$  обращается в 1, если главная словоформа словосочетаний обладает определенной семантико-грамматической информацией, и  $P(x) = 0$ , если главная словоформа коллокации не может обладать заданной семантико-грамматической информацией:

$$P(x) = a_x^{NNom} c_x^{Ag} \vee a_x^{NGen} c_x^{Att} \vee a_x^{NAcc} c_x^{Pac} \vee a_x^{NDat} c_x^{Adr} \vee a_x^{Nln} c_x^{Ins} \vee a_x^{NPr} c_x^M \vee a_x^{VNonRef} \quad (2)$$

Множество допустимых семантико-грамматических характеристик зависимого слова словосочетания описывается предикатом  $P(y)$ :

$$P(y) = a_y^{NNom} c_y^{Ag} \vee a_y^{NGen} c_y^{Att} \vee a_y^{NAcc} c_y^{Pac} \vee a_y^{NDat} c_y^{Adr} \vee a_y^{Nln} c_y^{Ins} \vee a_y^{NPr} c_y^M \vee a_y^{ANom} \vee a_y^{AGen} \vee a_y^{AAcc} \vee a_y^{ADat} \vee a_y^{Aln} \vee a_y^{APr} \quad (3)$$

Двухместный предикат  $P(x, y)$  описывает бинарное отношение, являющееся подмножеством конъюнкции  $P(x) \bullet P(y)$ , определяющее возможные сочетания семантико-грамматической информации словоформ двухсловных коллокаций:

$$P(x, y) = (a_y^{ANom} \vee a_y^{AGen} \vee a_y^{AAcc} \vee a_y^{ADat} \vee a_y^{Aln} \vee a_y^{APr}) (a_x^{NNom} c_x^{Ag} \vee a_x^{NGen} c_x^{Att} \vee a_x^{NAcc} c_x^{Pac} \vee a_x^{NDat} c_x^{Adr} \vee a_x^{Nln} c_x^{Ins} \vee a_x^{NPr} c_x^M) a_y^{NGen} c_y^{Att} \vee a_x^{VNonRef} a_y^{NAcc} c_y^{Pac} \quad (4)$$

Например,  $a_x^{NNom} c_x^{Ag} a_y^{NGen} c_y^{Att}$  описывает семантико-грамматически характеристики словосочетаний:

- *мова розмітки;*
- *період користування.*

Можно определить предикат семантической эквивалентности между коллокациями, определяющий семантико-грамматические характеристики коллокатов близких по смыслу словосочетаний. Отно-

шение семантической эквивалентности двух двухсловных коллокаций может быть определено как:

$$P(x_1, y_1) * P(x_2, y_2) = \gamma(x_1, y_1, x_2, y_2) \bullet P(x_1, y_1) \bullet P(x_2, y_2) \quad (5)$$

где знак  $*$  обозначает операцию определения смысловой близости, знак  $\bullet$  – определяет конъюнкцию, предикат  $\gamma(x_1, y_1, x_2, y_2)$  исключает коллокации, между которыми не может быть установлена смысловая эквивалентность.

Предикат  $\gamma_1(x_1, y_1, x_2, y_2) = a_{x_1}^{VNonRef} a_{y_1}^{NAcc} c_{y_1}^{Pac} a_{x_2}^{VNonRef} a_{y_2}^{NAcc} c_{y_2}^{Pac}$  показывает семантическую близость глагольных коллокаций. Например:

- *зберігати дані  $\approx$  тримати показники;*
- *визначати відомості  $\approx$  встановлювати дані  $\approx$  виявлення інформації.*

Предикат  $\gamma_2(x_1, y_1, x_2, y_2) = a_{x_1}^{NNom} c_{x_1}^{Ag} a_{y_1}^{NGen} c_{y_1}^{Att} a_{x_2}^{NNom} c_{x_2}^{Ag} a_{y_2}^{NGen} c_{y_2}^{Att}$  показывает семантическую близость субстантивных коллокаций, такими как:

- *набір приладдя  $\approx$  комплект устаткування;*
- *процес утворення  $\approx$  хід формування  $\approx$  процедура заснування.*

Предикат  $\gamma_3(x_1, y_1, x_2, y_2) = a_{y_1}^{ANom} a_{x_1}^{NNom} c_{x_1}^{Ag} a_{x_2}^{ANom} c_{x_2}^{Ag} a_{y_2}^{NGen} c_{y_2}^{Att}$  показывает семантическую близость между адъективной и субстантивной коллокациями, например:

- *грошовий переказ  $\approx$  відправлення коштів;*
- *інформаційний потік  $\approx$  кількість інформації.*

Таким образом, предикат семантической близости двухсловных коллокаций, у которых можно определить коллокаты как попарно семантические эквиваленты, определен как:

$$\gamma(x_1, y_1, x_2, y_2) = a_{y_1}^{ANom} a_{x_1}^{NNom} c_{x_1}^{Ag} a_{y_2}^{ANom} a_{x_2}^{NNom} c_{x_2}^{Ag} \vee (a_{x_1}^{NNom} c_{x_1}^{Ag} \vee a_{x_1}^{NGen} c_{x_1}^{Att} \vee a_{x_1}^{NAcc} c_{x_1}^{Pac} \vee a_{x_1}^{NDat} c_{x_1}^{Adr} \vee a_{x_1}^{Nln} c_{x_1}^{Ins} \vee a_{x_1}^{NPr} c_{x_1}^M) a_{y_1}^{NGen} c_{y_1}^{Att} (a_{x_2}^{NNom} c_{x_2}^{Ag} \vee a_{x_2}^{NGen} c_{x_2}^{Att} \vee a_{x_2}^{NAcc} c_{x_2}^{Pac} \vee a_{x_2}^{NDat} c_{x_2}^{Adr} \vee a_{x_2}^{Nln} c_{x_2}^{Ins} \vee a_{x_2}^{NPr} c_{x_2}^M) a_{y_2}^{NGen} c_{y_2}^{Att} \vee a_{x_1}^{VNonRef} a_{y_1}^{NAcc} c_{y_1}^{Pac} a_{x_2}^{VNonRef} a_{y_2}^{NAcc} c_{y_2}^{Pac} \quad (6)$$

В результате предикаты коллокаций, семантико-грамматические характеристики коллокатов которых обеспечат равенство единице, будут представлять близкие по смыслу или семантически эквивалентные словосочетания. А коллокации, семантико-грамматические характеристики которых обратят предикат  $\gamma(x_1, y_1, x_2, y_2)$  в нуль, будут обладать не близким семантическим значением.

Таким образом, логико-лингвистическая модель идентификации бинарных связей семантической эквивалентности между коллокациями позволяет формализовать отношение семантики, неявно выраженное в естественно-языковых конструкциях.



**Выводы.** В результате проведенного исследования была разработана логико-лингвистическая модель идентификации семантически близких коллокаций. Для построения модели использовался метод компонентного анализа. Для формализации семантически близких коллокаций выделены семантико-грамматические характеристики коллокатов, отношения между которыми описаны с использованием базового аппарата алгебры конечных предикатов.

Предложенная логико-лингвистическая модель призвана повысить эффективность работы существующих систем семантической обработки текстов, например, при устранении смысловой неоднозначности, извлечении фактов, построении тезауруса и др. за счет формализации как синтаксической, так и семантической информации о лексических единицах языка, и автоматизации выявления семантически эквивалентных словосочетаний.

**Список литературы:** 1. Church K. W. Word association norms, mutual information, and lexicography / K. W. Church, P. Hanks // *Computational Linguistics*, 1990. – № 16(1). – P. 22–29. 2. Evert S. Methods for the qualitative evaluation of lexical association measures / S. Evert, B. Krenn // *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Toulouse, France, 2001. – P. 188–195. 3. Захаров В. П. Выделение терминологических словосочетаний из специальных текстов на основе различных мер ассоциации / В. П. Захаров, М. В. Хохлова // Интернет и современное общество «IMS-2014»: сб. научн. статей XVII всероссийской объединенной конференции, 19-20 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – С. 290–293. 4. Akinina Y. S. The impact of syntactic structure on verb-noun collocation extraction / Y. S. Akinina, I. O. Kuznetsov, S. Y. Toldova //

Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии : материалы международной конференции «Диалог», 29 мая - 2 июня 2013 г., г. Бекасово. – М. : Изд-во РГГУ, 2013. – № 12 (19). – Т. 1. – С. 2–17. 5. Новое в зарубежной лингвистике : Вып. XXIV. Компьютерная лингвистика / ред. Б. Ю. Городецкого. – М. : Прогресс, 1989. – 432 с. 6. Кобозева И. М. Лингвистическая семантика: Учебное пособие / И. М. Кобозева. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 352 с. 7. Хайрова Н. Ф. Метод автоматической идентификации семантических корреляций терминов глоссария / Н. Ф. Хайрова, С. В. Петрасова, С. В. Ленков // Сборник научных трудов ВИКНУ имени Тараса Шевченко. – К. : ВИКНУ, 2014. – №46. – С. 128–135.

**Bibliography (transliterated):** 1. Church, K. W. "Word association norms, mutual information, and lexicography." *Computational Linguistics* 16.1 (1990): 22–29. Print. 2. Evert, S., and B. Krenn "Methods for the qualitative evaluation of lexical association measures." *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. France, 2001. 188–195. Print. 3. Zaharov, V. P., and M. V. Hohlova "Vydelenie terminologicheskikh slovosochetaniy iz spetsial'nykh textov na osnove razlichnykh mer assotsiatsii." *Proceedings of XVII "Internet and Modern Society IMS-2014" conference*. St. Petersburg: ITMO, 2014. 290–293. Print. 4. Akinina, Y. S., I. O. Kuznetsov and S. Y. Toldova "The impact of syntactic structure on verb-noun collocation extraction." *Proceedings of the annual international Dialogue conference "Computational Linguistics and Intellectual Technologies"*. No. 12(19). Moscow: RGGU, 2013. 2–17. Print. 5. *Novoe v zarubezhnoy lingvistike: No. XXIV. Computational linguistic*. Ed. B. Yu. Gorodetskiy. Moscow: Progress, 1989. Print. 6. Kobozeva, I. M. *Lingvisticheskaya semantika*. Moscow: Editorial URSS, 2000. Print. 7. Khairova, N. F., S. V. Petrasova and S. V. Lenkov "Metod avtomaticheskoy identifikatsii semanticheskikh korrelatsiy terminov glossariya." *Collection of Scientific Papers of the Military Institute* 46 (2014): 128–135. Print.

Поступила (received) 08.07.2015

**Петрасова Світлана Валентинівна** – аспірант кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем НТУ "ХПІ"; тел.: (093) 083-26-13; e-mail: svetapetrasova@gmail.com.

**Петрасова Светлана Валентиновна** – аспірант кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем НТУ "ХПІ"; тел.: (093) 083-26-13; e-mail: svetapetrasova@gmail.com.

**Petrasova Svitlana Valentynivna** – Postgraduate Student at the Department of Intelligent Computer Systems, NTU "KhPI"; tel.: (093) 083-26-13; e-mail: svetapetrasova@gmail.com.

**Хайрова Ніна Феліксівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем НТУ "ХПІ"; тел.: (050) 966-37-44; e-mail: nina\_khajrova@yahoo.com.

**Хайрова Нина Феликсовна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры интеллектуальных компьютерных систем НТУ "ХПІ"; тел.: (050) 966-37-44; e-mail: nina\_khajrova@yahoo.com.

**Khairova Nina Feliksivna** – Doctor of Computer Linguistics, Full Professor, Professor at the Department of Intelligent Computer Systems, NTU "KhPI"; tel.: (050) 966-37-44; e-mail: nina\_khajrova@yahoo.com.

О. Н. БЕЗМЕНОВА, И. П. ГАМАЮН, Н. И. БЕЗМЕНОВ

## ПОКАЗАТЕЛИ СТЕПЕНИ СВЯЗИ МЕЖДУ НОМИНАЛЬНЫМИ ПРИЗНАКАМИ

Рассматривается проблема оценивания степени связи между параметрами, измеряемыми в шкале наименований. Предложены показатели степени связи, основанные на максимизации вероятности правильного предсказания значения одного параметра по значению другого. Построены показатели, ориентированные на линейную зависимость от вероятностей отдельных значений, а также показатели с эллиптической зависимостью. На основе предложенных показателей сформированы коэффициенты связи. Получены оценки предложенных показателей степени связи, базирующиеся на принципе максимального правдоподобия. Сделаны выводы о возможности использования предложенных показателей степени связи при решении задач группировки параметров и классификации объектов.

**Ключевые слова:** степень связи, параметр, шкала наименований, показатель степени связи, коэффициент связи, линейная зависимость, эллиптическая зависимость, принцип максимального правдоподобия.

**Введение.** Несмотря на широкое применение методов группировки параметров и классификации объектов (кластерного анализа) общепринятого определения групп и классов нет [1]. Большинство разработчиков этих методов интуитивно понимают то, что элементы одной группы (или одного класса) должны быть ближе друг к другу, чем к другим элементам, однако особенности этого отношения в общем случае явно указать нельзя. Разработано довольно много показателей степени связи между параметрами (см., например, [2–4]), причем для количественных параметров чаще всего ориентируются на использование коэффициента корреляции [5–7].

**Цель статьи** – разработка коэффициентов для оценивания степени связи между параметрами, измеряемыми в шкале наименований.

**Постановка задачи.** Пусть имеется множество параметров  $S = \{X_j | j = \overline{1, N}\}$ , описывающих некоторый объект, над которым произведено  $n$  наблюдений. В ходе каждого наблюдения фиксируются значения параметров  $X_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Пусть результаты наблюдений над некоторым объектом представлены в виде матрицы наблюдений  $U = [x_{ij}]_{n \times N}$ ,  $i$ -я строка которой содержит результаты  $i$ -го наблюдения над множеством  $S$  параметров объекта, а  $j$ -й столбец составляют реализации параметра  $X_j$  в  $n$  наблюдениях. При оценивании степени связи между параметрами будем рассматривать только попарные связи. Без нарушения общности в качестве пары параметров рассмотрим  $X_1$  и  $X_2$ .

Пусть имеются два параметра  $X_1$  и  $X_2$ , измеряемые в шкале наименований, и пусть количества различных значений, которые могут принять эти параметры, равны соответственно  $n_1$  и  $n_2$ . Построим показатели степени связи для таких параметров.

**Решение.** Рассмотрим параметры  $X_1$  и  $X_2$  как случайные величины и будем полагать, что известно их совместное распределение:

Рассмотрим параметры  $X_1$  и  $X_2$  как случайные величины и будем полагать, что известно их совместное распределение:

$$p_{ij}, i = \overline{1, n_1}, j = \overline{1, n_2}.$$

Связь между параметрами  $X_1$  и  $X_2$  будем оценивать возможностью предсказания значения параметра  $X_2$  по значению параметра  $X_1$  (либо наоборот). В этом случае максимальная связь будет существовать только в случае, когда любому значению параметра  $X_1$  будет соответствовать одно и только одно значение параметра  $X_2$ , то есть для любого  $i$  ( $i = \overline{1, n_1}$ ) выполняется соотношение

$$p_{ij} = \begin{cases} p_i & \text{при } j = j^{0i}, \\ 0 & \text{при } j = \overline{1, n_2}, j \neq j^{0i}, \end{cases}$$

$$p_i = \sum_{j=1}^{n_2} p_{ij}$$

где

Минимальной связи будет соответствовать случай невозможности предсказания значения случайной величины  $X_2$  по значению величины  $X_1$ , то есть при выполнении условия

$$p_{ij} = \frac{p_i}{n_2}, j = \overline{1, n_2}, i = \overline{1, n_1}.$$

Исходя из изложенного выше, связь между параметрами  $X_1$  и  $X_2$  можно оценивать по максимальной вероятности предсказания по значению параметра  $X_1$  значения параметра  $X_2$ , а в качестве показателя степени зависимости  $X_2$  от  $X_1$  рассматривать сумму этих вероятностей:

$$\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) = \sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} p_{ij}.$$

Отметим, что величина  $\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2)$  принимает свои значения в отрезке  $\left[ \frac{1}{n_2}, 1 \right]$ .

Аналогично можно построить показатель степени

зависимости параметра  $X_1$  от параметра  $X_2$  :

$$\zeta_1(X_1 \leftarrow X_2) = \sum_{j=1}^{n_2} \max_{i=1, n_1} p_{ij}.$$

Этот показатель принимает свои значения в отрезке  $\left[ \frac{1}{n_1}, 1 \right]$ .

При отсутствии информации о направлении возможной связи между двумя параметрами возможно использование агрегированного показателя, в качестве которого может быть использован один из следующих показателей:

$$\zeta_1(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_1(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\zeta_2(X_1 : X_2) = \max(\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_1(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\zeta_3(X_1 : X_2) = \min(\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_1(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Поскольку различные значения одного параметра в разной степени оказывают влияние на значение другого параметра, желательным является учет этого факта в показателе степени связи. Учет того, в какой степени каждое возможное значение одного параметра определяет значение другого параметра, обеспечивают такие показатели:

$$\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}}; \quad (1)$$

$$\zeta_2(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{\max_{i=1, n_1} p_{ij}}{p_{.j}}; \quad (2)$$

$$\zeta_4(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\zeta_5(X_1 : X_2) = \max(\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\zeta_6(X_1 : X_2) = \min(\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Величина  $p_{.j}$  в выражении (2) определяется по формуле:

$$p_{.j} = \sum_{i=1}^{n_1} p_{ij}.$$

Пусть теперь имеется выборка из  $n$  наблюдений над парой указанных параметров  $X_1$  и  $X_2$  и пусть величина  $m_{ij}$  ( $i = \overline{1, n_1}$ ,  $j = \overline{1, n_2}$ ) определяет, сколько раз в выборке  $i$ -му значению параметра  $X_1$  соответствует  $j$ -е значение параметра  $X_2$ . Тогда для величины  $p_{ij}$  имеем следующую оценку максимального правдоподобия:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n}, \quad i = \overline{1, n_1}, \quad j = \overline{1, n_2}.$$

Выборочными оценками максимального правдоподобия значений  $p_{i.}$  и  $p_{.j}$  являются следующие величины:

$$\hat{p}_{i.} = \sum_{j=1}^{n_2} \hat{p}_{ij}, \quad i = \overline{1, n_1};$$

$$\hat{p}_{.j} = \sum_{i=1}^{n_1} \hat{p}_{ij}, \quad j = \overline{1, n_2}$$

или иначе

$$\hat{p}_{i.} = \frac{m_{i.}}{n}, \quad i = \overline{1, n_1};$$

$$\hat{p}_{.j} = \frac{m_{.j}}{n}, \quad j = \overline{1, n_2},$$

где  $m_{i.} = \sum_{j=1}^{n_2} m_{ij}$ ,  $m_{.j} = \sum_{i=1}^{n_1} m_{ij}$ .

Тогда можно получить следующие оценки максимального правдоподобия для введенных выше показателей степени связи:

$$\hat{\zeta}_1(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} m_{ij};$$

$$\hat{\zeta}_1(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_2} \max_{i=1, n_1} m_{ij};$$

$$\hat{\zeta}_1(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_1(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_1(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\hat{\zeta}_2(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_1(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_1(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\hat{\zeta}_3(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_1(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_1(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\max_{j=1, n_2} m_{ij}}{m_{i.}};$$

$$\hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{\max_{i=1, n_1} m_{ij}}{m_{.j}};$$

$$\hat{\zeta}_4(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\hat{\zeta}_5(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\hat{\zeta}_6(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Для сопоставления степени связи для различных пар параметров желательным является наличие у показателей степени связи следующих свойств:

- ♦ принятие значений в интервале от 0 до 1 включительно;
- ♦ принятие значения 1 при жесткой зависимости двух параметров;
- ♦ принятие нулевого значения при отсутствии связи между параметрами.

Все рассмотренные выше показатели степени связи обладают двумя первыми свойствами, но не обладают третьим. Осуществим их преобразование, направленное на обеспечение выполнения третьего свойства с сохранением первых двух.

Поскольку величина  $\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2)$  принимает свои значения в отрезке  $\left[\frac{1}{n_2}, 1\right]$ , вычтем из нее ее минимальное значение, равное  $\frac{1}{n_2}$ , и разделим полученное выражение на максимальное значение, которое оно может принять.

Получаем следующий результат:

$$\frac{\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) - \frac{1}{n_2}}{\max\left(\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) - \frac{1}{n_2}\right)} = \frac{\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) - \frac{1}{n_2}}{\max_{i=1, n_2} p_{ij} - \frac{1}{n_2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{1}{n_2}}{1 - \frac{1}{n_2}}$$

Итак, величина

$$\zeta_3(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{1}{n_2}}{1 - \frac{1}{n_2}}$$

обладает свойствами коэффициента степени связи.

Аналогично можно ввести коэффициент влияния

$$\zeta_3(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} \max_{i=1, n_1} p_{ij} - \frac{1}{n_1}}{1 - \frac{1}{n_1}}, \quad (3)$$

а также следующие агрегированные коэффициенты связи

$$\zeta_5(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2)}{2}; \quad (4)$$

$$\zeta_6(X_1 : X_2) = \max(\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2)); \quad (5)$$

$$\zeta_7(X_1 : X_2) = \min(\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_2(X_1 \leftarrow X_2)). \quad (6)$$

Выборочными оценками максимального правдоподобия коэффициентов (3)–(6) являются следующие показатели:

$$\hat{\zeta}_3(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} m_{ij} - \frac{1}{n_2}}{1 - \frac{1}{n_2}};$$

$$\hat{\zeta}_3(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_2} \max_{i=1, n_1} m_{ij} - \frac{1}{n_1}}{1 - \frac{1}{n_1}};$$

$$\hat{\zeta}_8(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\hat{\zeta}_9(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\hat{\zeta}_{10}(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_2(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_2(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Сформируем теперь коэффициенты связи на базе показателей (1)–(2). Для этого определим сначала диапазон изменения показателя связи  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)$ .

Наименьшее значение этого показателя достигается в случае невозможности предсказания значения параметра  $X_2$  по значению параметра  $X_1$ . Этой ситуации соответствует случай равновероятности всех возможных значений  $X_2$  для любого из возможных значений  $X_1$ , то есть при

$$p_{ij} = \frac{1}{n_1 n_2}, \quad j = \overline{1, n_2}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

При этом

$$\max_{j=1, n_2} p_{ij} = \frac{1}{n_1 n_2}, \quad i = \overline{1, n_1};$$

$$p_{i.} = \sum_{j=1}^{n_2} p_{ij} = \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{n_1 n_2} = \frac{1}{n_1}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

Следовательно,

$$\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\min} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1/n_1 n_2}{1/n_1} = \frac{1}{n_1} \cdot n_1 \cdot \frac{1}{n_2} = \frac{1}{n_2}.$$

В то же время максимальное значение показателя  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)$  достигается в том случае, когда значение параметра  $X_1$  с вероятностью 1 определяет значение параметра  $X_2$ , то есть если выполняется соотношение

$$\max_{i=1, n_1} p_{ij} = p_{i.}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

Таким образом,

$$\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\max} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_{i.}}{p_{i.}} = 1.$$

Итак,

$$\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) \in \left[\frac{1}{n_2}, 1\right].$$

Для перехода к интервалу  $[0, 1]$  вычтем из  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)$  значение  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\min}$  и разделим результат на  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\max} - \zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\min}$ , после чего выполним некоторые преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) - \zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\min}}{\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\max} - \zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)_{\min}} &= \frac{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}} - \frac{1}{n_2}}{1 - \frac{1}{n_2}} = \\ &= \frac{\left( \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}} - \frac{n_1}{n_2} \right)}{1 - \frac{1}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \left( \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}} - \frac{1}{n_2} \right) = \\ &= \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \left( n_2 \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}} - 1 \right). \end{aligned}$$

В результате получаем следующий коэффициент степени связи:

$$\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \left( n_2 \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}} - 1 \right).$$

Его выборочная оценка может быть представлена следующим образом:

$$\hat{\zeta}_4(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \left( n_2 \frac{\max_{j=1, n_2} m_{ij}}{m_{i.}} - 1 \right).$$

Аналогично можно построить коэффициент связи, отражающий влияние параметра  $X_2$  на параметр  $X_1$ :

$$\zeta_4(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \left( n_1 \frac{\max_{i=1, n_1} p_{ij}}{p_{j.}} - 1 \right),$$

а также агрегированные коэффициенты связи:

$$\zeta_8(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_4(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\zeta_9(X_1 : X_2) = \max(\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_4(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\zeta_{10}(X_1 : X_2) = \min(\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_4(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Их выборочные оценки определяются следующими выражениями:

$$\hat{\zeta}_4(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \left( n_1 \frac{\max_{i=1, n_1} m_{ij}}{p_{j.}} - 1 \right),$$

$$\hat{\zeta}_8(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_4(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_4(X_1 \leftarrow X_2)}{2};$$

$$\hat{\zeta}_9(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_4(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_4(X_1 \leftarrow X_2));$$

$$\hat{\zeta}_{10}(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_4(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_4(X_1 \leftarrow X_2)).$$

Если рассматривать введенные выше показатели степени связи между двумя параметрами как функции, аргументами которых является величина  $\max_{j=1, n_2} p_{ij}$  (или  $\max_{i=1, n_1} p_{ij}$ ), то можно отметить линейность этих функций. Рассмотрим несколько иной принцип построения показателя степени связи между двумя параметрами.

Как и ранее, в качестве аргумента функции для показателя, отражающего возможность предсказания значения параметра  $X_2$  по значению параметра  $X_1$ , возьмём величину  $\max_{j=1, n_2} p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n_1}$ , которая изменяет свое значение на интервале от  $\frac{p_{i.}}{n_2}$  (случай невозможности предсказания) до  $p_{i.}$  (случай абсолютной определенности) включительно.

Рассмотрим эллипс, описываемый следующим уравнением:

$$\frac{\left( \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}{\left( p_{i.} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2} + \frac{(y_i - 1)^2}{1^2} = 1, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

Графическое отображение этого эллипса приведено на рис. 1 (для обеспечения наглядности на рисунке использованы различные шкалы по двум осям координат).

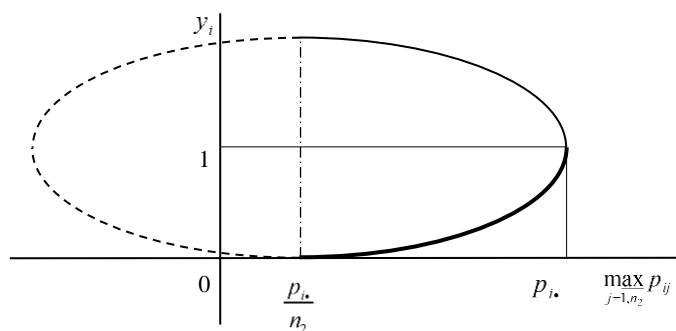


Рис. 1 – Первый вариант формирования составляющей коэффициента связи

Отметим, что аргумент  $\max_{j=1, n_2} p_{ij}$  в данном случае

существует только на отрезке  $\left[ \frac{p_{i.}}{n_2}, p_{i.} \right]$ . Поэтому

часть эллипса слева от его вертикальной оси симметрии физически не может существовать.

Получим выражение для  $y_i$ :

$$y_{i(1,2)} = 1 \mp \sqrt{1 - \frac{\left( \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}{\left( p_{i.} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

Поскольку требованием к коэффициенту связи является принятие им значений из отрезка числовой оси от 0 до 1 с установлением факта отсутствия связи при равенстве его 0 и факта наличия полной связи при 1, нас интересует нижняя часть правой половины эллипса, представленного на рис. 1. Запишем выражение для этой части эллипса и выполним некоторые преобразования этого выражения:

$$\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2) = 1 - \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{n_2} \right)^2 - \left( \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.}}{p_{i.}} - \frac{1}{n_2} \right)^2}.$$

Выборочная оценка этого показателя имеет следующий вид:

$$\hat{\zeta}_5(X_1 \rightarrow X_2) = 1 - \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{n_2} \right)^2 - \left( \frac{\max_{j=1, n_2} m_{ij} - p_{i.}}{m_{i.}} - \frac{1}{n_2} \right)^2}.$$

Рассмотрим теперь эллипс, задаваемый таким уравнением (см. также рис. 2):

$$\frac{\left( \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}{\left( p_{i.} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2} + \frac{(y_i - 0)^2}{1^2} = 1, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

$$y_{i(1)} = 1 - \sqrt{1 - \frac{\left( \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}{\left( p_{i.} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{\left( n_2 \max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.} \right)^2}{p_{i.}^2 (n_2 - 1)^2}} =$$

$$= 1 - \frac{1}{n_2 - 1} \sqrt{\left( n_2 - 1 \right)^2 - \frac{\left( n_2 \max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.} \right)^2}{p_{i.}^2}} =$$

$$= 1 - \frac{1}{n_2 - 1} \sqrt{\left( n_2 - 1 \right)^2 - \left( \frac{n_2 \max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.}}{p_{i.}} - 1 \right)^2} =$$

$$= 1 - \frac{n_2}{n_2 - 1} \sqrt{\left( 1 - \frac{1}{n_2} \right)^2 - \left( \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.}}{p_{i.}} - \frac{1}{n_2} \right)^2}$$

Тогда коэффициент связи, отражающий степень влияния параметра  $X_1$  на параметр  $X_2$ , можно сформировать как среднее арифметическое всех показателей  $y_{i(1)}$ :

Как и у эллипса на рис. 1, у данного эллипса аргумент  $\max_{j=1, n_2} p_{ij}$  физически также может принимать

значения только из отрезка  $\left[ \frac{p_{i.}}{n_2}, p_{i.} \right]$ .

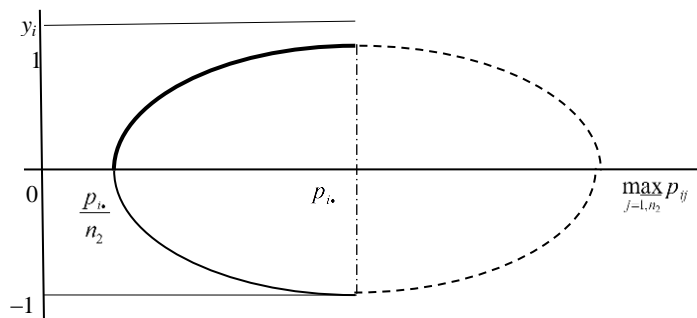


Рис. 2 – Второй вариант формирования составляющей коэффициента связи

В этом случае имеем: 
$$y_{i(1,2)} = 1 \mp \sqrt{1 - \frac{\left( \max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.} \right)^2}{\left( p_{i.} - \frac{p_{i.}}{n_2} \right)^2}}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

В качестве составляющей коэффициента связи будем рассматривать только верхнюю часть левой половины эллипса:

$$y_{i(2)} = \sqrt{1 - \frac{\left(\max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i\cdot}\right)^2}{\left(p_{i\cdot} - \frac{p_{i\cdot}}{n_2}\right)^2}}.$$

Выполнив преобразования, аналогичные тем, которые осуществлялись при формировании показателя степени связи  $\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2)$ , получаем следующее выражение для  $y_{i(2)}$ :

$$y_{i(2)} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i\cdot}}\right)^2}, \quad i = \overline{1, n_1}.$$

Используя эти выражения, получаем следующий коэффициент связи:

$$\zeta_6(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i\cdot}}\right)^2}.$$

Его выборочная оценка имеет вид:

$$\hat{\zeta}_6(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{j=1, n_2} m_{ij}}{m_{i\cdot}}\right)^2}$$

$$\zeta_5(X_1 \leftarrow X_2) = 1 - \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2 - \left(\frac{\max_{i=1, n_1} p_{ij} - p_{\cdot j}}{p_{\cdot j}} - \frac{1}{n_1}\right)^2},$$

$$\zeta_6(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{i=1, n_1} p_{ij}}{p_{\cdot j}}\right)^2},$$

$$\zeta_7(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{\zeta_5(X_1 \leftarrow X_2) + \zeta_6(X_1 \leftarrow X_2)}{2}$$

и их выборочные оценки:

$$\hat{\zeta}_5(X_1 \leftarrow X_2) = 1 - \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2 - \left(\frac{\max_{i=1, n_1} m_{ij} - m_{\cdot j}}{m_{\cdot j}} - \frac{1}{n_1}\right)^2},$$

$$\hat{\zeta}_6(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{n_1}{n_2(n_1 - 1)} \sum_{j=1}^{n_2} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_1}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{i=1, n_1} m_{ij}}{m_{\cdot j}}\right)^2},$$

$$\hat{\zeta}_7(X_1 \leftarrow X_2) = \frac{\hat{\zeta}_5(X_1 \leftarrow X_2) + \hat{\zeta}_6(X_1 \leftarrow X_2)}{2}.$$

Если направление связи неизвестно, то предлагается использовать такие коэффициенты связи:

Как компромиссный по отношению к коэффициентам связи  $\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2)$  и  $\zeta_6(X_1 \rightarrow X_2)$  может быть рассмотрен коэффициент связи, построенный на среднем арифметическом  $\bar{y}_i$  величин  $y_{i(1)}$  и  $y_{i(2)}$ ,  $i = \overline{1, n_1}$  (см. рис. 3),

$$\zeta_7(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_6(X_1 \rightarrow X_2)}{2}$$

с выборочной оценкой

$$\hat{\zeta}_7(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\hat{\zeta}_5(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_6(X_1 \rightarrow X_2)}{2}.$$

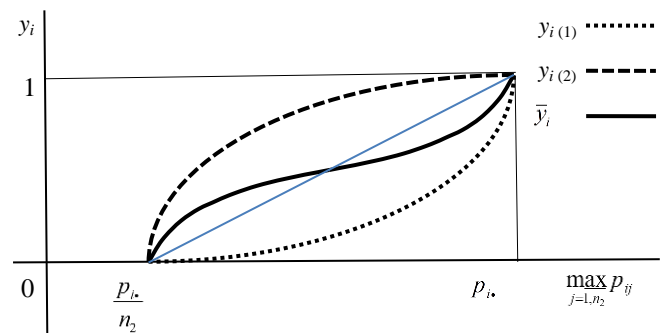


Рис. 3 – Составляющая агрегированного коэффициента связи

Аналогично могут быть построены коэффициенты степени связи, отражающие влияние параметра  $X_2$  на параметр  $X_1$ :

$$\zeta_{11}(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_5(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\zeta_{12}(X_1 : X_2) = \max(\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_5(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\zeta_{13}(X_1 : X_2) = \min(\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_5(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\zeta_{14}(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_6(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_6(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\zeta_{15}(X_1 : X_2) = \max(\zeta_6(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_6(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\zeta_{16}(X_1 : X_2) = \min(\zeta_6(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_6(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\zeta_{17}(X_1 : X_2) = \frac{\zeta_7(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_7(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\zeta_{18}(X_1 : X_2) = \max(\zeta_7(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_7(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\zeta_{19}(X_1 : X_2) = \min(\zeta_7(X_1 \rightarrow X_2), \zeta_7(X_1 \leftarrow X_2))$$

и их выборочные оценки:

$$\hat{\zeta}_{11}(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_5(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_5(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\hat{\zeta}_{12}(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_5(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_5(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\hat{\zeta}_{13}(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_5(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_5(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\hat{\zeta}_{14}(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_6(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_6(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\hat{\zeta}_{15}(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_6(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_6(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\hat{\zeta}_{16}(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_6(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_6(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\hat{\zeta}_{17}(X_1 : X_2) = \frac{\hat{\zeta}_7(X_1 \rightarrow X_2) + \hat{\zeta}_7(X_1 \leftarrow X_2)}{2},$$

$$\hat{\zeta}_{18}(X_1 : X_2) = \max(\hat{\zeta}_7(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_7(X_1 \leftarrow X_2)),$$

$$\hat{\zeta}_{19}(X_1 : X_2) = \min(\hat{\zeta}_7(X_1 \rightarrow X_2), \hat{\zeta}_7(X_1 \leftarrow X_2)).$$

**Безменова Ольга Николаевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирантка кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: 063-47-50-802; e-mail: bezmenova\_olga@bk.ru.

**Bezmenova Olga Mykolayivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; tel.: 063-47-50-802; e-mail: bezmenova\_olga@bk.ru.

**Гамаюн Игорь Петрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», декан факультета информатики и управления, профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления, тел.: 057-707-61-15; e-mail: ipgamayun@kpi.kharkov.ua.

**Gamayun Igor Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Dean of the Faculty of Informatics and Control, Professor of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; tel.: 057-707-61-15; e mail: ipgamayun@kpi.kharkov.ua.

**Безменов Николай Иванович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и управления; тел.: 057-707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua.

**Bezmenov Mykola Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Analysis of the Systems and Control; tel.: 057-707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua.

**Выводы.** Разработанные показатели степени связи между параметрами могут быть использованы при решении задач группировки параметров и классификации объектов. Предложенные показатели степени связи ориентированы на номинальную шкалу. Поэтому они могут быть использованы и при анализе систем параметров, которые описываются в порядковых шкалах, для чего достаточно осуществить переход от порядковой шкалы к шкале наименований посредством отказа от учета отношения упорядочения значений, присущего порядковым шкалам, и учитывать только различие значений.

**Список литературы:** 1. Сокал Р. Р. Кластер-анализ и классификация: предпосылки и основные направления / Р. Р. Сокал // Классификация и кластер / ред. Дж. Вэн Райзин; перевод с англ. П. П. Кольцова; под ред. Ю. И. Журавлева. – М.: Мир, 1980. – С. 7–19. 2. Кендалл М. Дж. Статистические выводы и связи: пер. с англ. / М. Дж. Кендалл, А. Стюарт / пер. Л. И. Гальчук, А. Т. Терехин; ред. А. Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1973. – 899 с. 3. Елисеева И. И. Статистические методы измерения связей / И. И. Елисеева. – Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1982. – 136 с. 4. Елисеева И. И. Группировка, корреляция, распознавание образов / И. И. Елисеева, В. О. Рукавишников. – М.: Статистика, 1977. – 144 с. 5. Венцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Венцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с. 6. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения: в 2 т.: пер. с англ. / В. Феллер / пер. Ю. В. Прохоров. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 528 с. 7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sokal, R. R. Sokal, R. R. «Klaster-analiz i klassifikacija: predposylki i osnovnye napravlenija.» Edited by Van Rysen, J. Klassifikacija i klaster. Moscow: Mir, 1980. 7–19. Print. 2. Kendall, M. G. and A. Stuart. *Statisticheskie vyvody i svyazi*. Moscow: Nauka, 1973. Print. 3. Eliseeva, I. I. *Statisticheskie metody izmerenija svyazej*. Leningrad: Izd-vo Leningr. gos. un-ta, 1982. Print. 4. Eliseeva, I. I. and V. O. Rukavishnikov. *Gruppirovka, korrelyacija, raspoznavanie obrazov*. Moscow: Statistka, 1977. Print. 5. Vencel', E. S. *Teorija veroyatnostej*. Moscow: Nauka, 1969. Print. 6. Feller, V. *Vvedenie v teoriju veroyatnostej i ejo prilozhenija*. Vol. 1. M: Mir, 1984. Print. 7. Gmurman, V. E. *Teorija veroyatnostej i matematicheskaja statistika*. Moscow: Vyssh. shk., 2003. Print.

Поступила (received) 05.12.2015



**А. С. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО, В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ**

## СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Предлагается один из возможных подходов к синтезу регулятора параметров технологического процесса, математическая модель которого представлена в виде системы трансцендентных уравнений, связывающих входы и выходы технологического процесса. Целью работы является адаптация методов современной теории управления к управлению квазистатическими процессами. Подробно рассмотрен линейный случай взаимосвязи «вход-выход» и квадратичный критерий качества процесса стабилизации параметров технологического процесса.

**Ключевые слова:** технологический процесс, система стабилизации, линейно-квадратичная задача, квазистатическая математическая модель, теория управления.

**Введение.** Задачи управления сложными технологическими процессами (ТП) в теплоэнергетике, металлургии и химической промышленности обычно осложнены значительными неопределенностями математических моделей рабочих процессов объектов управления. В самом общем случае математические модели перечисленных технологических процессов, состоят из композиций подсистем дифференциальных уравнений (обыкновенных или в частных производных), дополненных между собой статическими связями [1–4]. Математические модели технологических процессов в форме дифференциальных уравнений позволяют моделировать как переходные, так и установившиеся режимы функционирования технологического оборудования, соответствующие нулевым значениям производных, входящих в систему дифференциальных уравнений. Квазистатические математические модели технологических процессов обладают тем достоинством, что они могут быть получены на основе экспериментальных данных методами планирования экспериментов. Недостатком квазистатических математических моделей управляемых процессов является их слабая приспособленность к методам современной теории управления, ориентированной на управление динамическими объектами.

Целью настоящей работы является адаптация некоторых методов современной теории управления к управлению технологическими процессами, представленными квазистатическими математическими моделями.

**Постановка задачи.** Будем рассматривать некоторый технологический процесс, характеризующийся вектором технологических параметров  $x \in R^m$ . Компоненты вектора  $x$  связаны между собой системой технологических уравнений

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, \quad k = \overline{1, p}, \quad (1)$$

полученных на основании различных физических законов и экспериментальных данных. Вектор  $x$  предполагается состоящим из двух составляющих  $x^1 \in R^n$  и  $x^2 \in R^{m-n}$ . Вектор  $x^1$  соответствует вектору выходных координат, характеризующих результат технологического процесса, а  $x^2$  представляет собой множество управляющих параметров, выбор которых определяет результат технологического процесса  $x^1$ .

Будем далее предполагать, что количество уравнений  $p$  в системе (1) совпадает с размерностью  $n$  вектора  $x^1$ , а размерность  $x^1$  совпадает с размерностью  $x^2$ . Таким образом, (1) задает неявное отображение

$$R^n \xrightarrow{G} R^n$$

Будем также предполагать, что  $G$  гомеоморфно и существует обратное преобразование  $\overline{G}$ . Математическую модель, удовлетворяющую перечисленным требованиям, будем называть нормальной и далее записывать в следующей форме

$$f(x, u) = 0, \quad (2)$$

где  $x \triangleq x^1$  – вектор выхода технологического процесса;  $u \triangleq x^2$  – вектор управляющих параметров;  $f(x, u)$  –  $n$ -мерная вектор-функция.

По отношению к технологической системе, представленной математической моделью (2), сформулируем две постановки основных задач управления технологическим процессом.

**Задача 1.** Для заданного значения вектора выхода  $x^*$  найти вектор управляющих параметров  $u^*$  такой, чтобы выполнялось условие

$$f(x^*, u^*) = 0.$$

Эту задачу можно назвать задачей предварительной настройки параметров технологического процесса, и сводится она к решению системы уравнений (2) относительно вектора  $u$  при заданном  $x = x^*$ .

**Задача 2.** Представляет собой задачу стабилизации технологической системы относительно выбранного положения равновесия  $(x^*, u^*)$ .

Настоящая работа посвящена структурному и параметрическому синтезу системы стабилизации заданного положения равновесия, т. е. решению задачи 2.

**Выбор структуры системы стабилизации.** Поскольку математическая модель вида (2) является приближенной и в процессе функционирования технологической системы имеют место параметрические возмущения, то естественно априори отказаться от рассмотрения регулятора, основанного на измерениях

возмущений, и в дальнейшем рассматривать регулятор, основанный на принципе обратной связи.

Как было отмечено ранее, методы теории управления ориентированы на использование математических моделей управляемых процессов в форме дифференциальных уравнений.

В связи с этим введем в контур обратной связи интегрирующие звенья

$$\dot{u} = \delta. \quad (3)$$

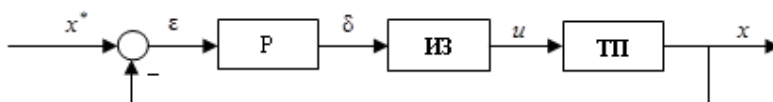


Рис. 1 – Структурная схема регулятора параметров технологического процесса. P – регулятор, ИЗ – интегрирующее звено, ТП – технологический процесс

Схема на рис. 1 является классической схемой системы автоматического регулирования, которую можно увидеть в любом учебнике по ТАУ. Однако, некоторые ее особенности, связанные со статичностью технологического процесса и наличием чистых интеграторов в цепи обратной связи, позволяют получить ряд частных результатов в области теории синтеза параметров систем управления. Ниже в рамках выбранной структуры системы стабилизации будет рассмотрена задача параметрического синтеза регулятора, обеспечивающего устойчивость и наилучшее качество стабилизации рабочей точки ТП.

**Линейно-квадратичная задача стабилизации рабочей точки ТП.** Линейно-квадратичная задача оптимального управления (ЛКЗ) является одной из немногих задач теории управления, решенных в общем виде. Параметры регулятора, полученные в результате решения ЛКЗ, обеспечивают устойчивость замкнутой системы и необходимое качество переходных процессов, обусловленное выбором весовых матриц квадратичного критерия качества.

Предварительно рассмотрим линейную статическую модель технологического процесса

$$x = Bu, \quad (4)$$

где  $x \in R^n$ ,  $u \in R^n$ ,  $B$  – невырожденная  $n \times n$  матрица, и поставим задачу стабилизации нулевого положения равновесия  $x=0$ ,  $u=0$  с интегральным квадратичным критерием качества

$$Y = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + \delta^T R \delta) dt, \quad (5)$$

где  $Q$  и  $R$  положительные симметрические матрицы; а  $\delta \in R^n$  – вектор управлений, связанный с управляемыми переменными соотношением (3).

Соотношения (4) и (3) можно заменить традиционной системой дифференциальных уравнений в форме Коши, представляющей собой стандартный вид объекта управления в пространстве состояний

Таким образом, вместо управлений  $u(t)$  будем считать управлениями скорости изменения компонент вектора  $u$ , т. е. величину  $\delta$ . В связи с отмеченными обстоятельствами и сделанными предположениями будем рассматривать следующую структурную схему системы стабилизации положения рабочей точки технологического процесса (рис. 1).

$$\dot{x} = B\delta. \quad (6)$$

Воспользовавшись общеизвестным методом решения данной задачи оптимизации [5], получим закон управления в виде

$$\delta = -R^{-1}B^T P x = Kx, \quad (7)$$

где  $K = -R^{-1}B^T P$  – матричный коэффициент усиления; а  $P$  – положительное решение матричного уравнения Риккати, принимающего для данной задачи следующий вид:

$$PBR^{-1}B^T P = Q. \quad (8)$$

Полученное уравнение (8) отличается от общего вида уравнения Риккати отсутствием линейных слагаемых в связи с нулевой матрицей динамики. Для его решения воспользуемся следующим приемом. Без ограничения общности будем считать симметрическую матрицу  $BR^{-1}B^T$  единичной, поскольку, как известно из теории матриц [6], всегда можно выбрать линейное преобразование координат  $y = Tx$  такое, что в новом базисе рассматриваемая матрица будет единичной, а матрица  $Q$  преобразуется в  $\bar{Q}$ .

Таким образом, вместо уравнения (8) будем рассматривать уравнение

$$P^2 = \bar{Q}. \quad (9)$$

Для решения (9) воспользуемся спектральной теоремой [7]. Пусть  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – спектр матрицы  $\bar{Q}$ , а  $u_1, u_2, \dots, u_n$  и  $v_1, v_2, \dots, v_n$  – квазибиортогональные системы правых и левых собственных векторов. Тогда ее спектральное представление имеет вид

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n \lambda_i G_i, \quad (10)$$

где  $G_i = u_i v_i^T$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – сопутствующие матрицы.

Поскольку все  $\lambda_i > 0$  в силу положительности матрицы  $Q$ , то в соответствии с [7] решение (9) имеет

вид

$$P = \sum_{i=1}^n \sqrt{\lambda_i} G_i. \quad (11)$$

Полученное решение положительно, а, следовательно, является искомым решением уравнения Риккати.

Рассмотрим теперь замкнутую систему стабилизации нулевого положения равновесия с управлением (6). Система уравнений замкнутой системы стабилизации запишется как

$$\dot{x} = -BR^{-1}B^T Px \quad (12)$$

Проанализируем качественную структуру переходных процессов в однородной линейной системе (12) при ненулевых начальных условиях. Для этого представим (12) в виде

$$F\dot{x} + Px = 0, \quad (13)$$

где матрица  $F = (BR^{-1}B^T)^{-1}$  представляет собой положительную симметрическую матрицу.

Из теории матриц [6] известно, что существует линейное преобразование координат  $x = Yu$  такое, что матрицы  $Y^T FY$  и  $Y^T PY$  одновременно принимают диагональный вид:

$$Y^T FY = E, \quad Y^T PY = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n),$$

где  $\mu_k$  – корни характеристического уравнения пучка квадратичных форм с матрицами  $P$  и  $F$

$$|P - \mu F| = 0. \quad (14)$$

Таким образом, в системе координат  $u$  векторное уравнение (13) распадается на  $n$  независимых дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{y}_k = -\mu_k y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (15)$$

где все числа  $\mu_k > 0$ .

Поскольку решения уравнений (15) имеют вид

$$y_k = y_k^0 e^{-\mu_k t}, \quad (16)$$

где  $y_k^0$  – начальные условия, то переходные процессы по всем компонентам вектора  $x$  также имеют аperiodический характер.

Вернемся теперь к задаче стабилизации ненулевой рабочей точки технологического процесса. Тогда схема на рис. 1 будет соответствовать следующая система уравнений:

$$x = Bu, \quad \dot{u} = \delta, \quad \delta = K\varepsilon, \quad \varepsilon = x^* - x, \quad (17)$$

которая после несложных преобразований примет вид

$$\dot{\varepsilon} = BK\varepsilon. \quad (18)$$

Система (18) оптимальна в смысле интегрального квадратичного критерия качества

$$Y = \int_0^{\infty} (\varepsilon^T Q \varepsilon + \delta^T R \delta) dt, \quad (19)$$

а вектор выхода  $x$  аperiodически стремится к заданной рабочей точке  $x^*$ .

Как видно из предыдущего рассмотрения, оптимальный регулятор переходных процессов основан на измерении всех компонент вектора  $x$ . Рассмотрим случай, когда в процессе управления измеряется вектор  $y \in R^l$

$$y = Cx, \quad (20)$$

где  $C$  –  $(l \times n)$  матрица измерений.

В теории управления для восстановления вектора  $x$  по измерениям  $y$  обычно используются наблюдающие устройства. Полноразмерный наблюдатель вектора состояния системы (6) по измерениям (20) в соответствии с [8] описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\hat{x}} = L(y - C\hat{x}) + B\delta, \quad (21)$$

где  $\hat{x} \in R^n$  – оценка вектора  $x$ .

Из (21) следует, что при любом выборе матрицы наблюдателя  $L$  невозможно получить асимптотическую сходимость оценки  $\hat{x}$  к  $x$ , поскольку  $n \times n$  матрица динамики наблюдателя  $(-LC)$  представляет собой произведение двух прямоугольных матриц, каждая из которых имеет ранг  $l < n$ , а, следовательно, матрица  $LC$  всегда вырождена.

Рассмотрим случай, когда непосредственному измерению доступны некоторые линейные комбинации (или отдельные компоненты) вектора выхода

$$y = Cx, \quad y \in R^l \quad (22)$$

и вектора входа

$$z = Du, \quad z \in R^{n-l}. \quad (23)$$

Для восстановления вектора  $x$  по измерениям  $y$  и  $z$  (22) и (23) подставим (4) в (22). В результате получим систему линейных уравнений относительно  $u$

$$\begin{pmatrix} CB \\ \dots \\ D \end{pmatrix} u = \begin{pmatrix} y \\ \dots \\ z \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Таким образом, критерием наблюдаемости вектора  $u$  по  $y, z$  является неособенность матрицы системы (24)

$$\left| \begin{pmatrix} CB \\ \dots \\ D \end{pmatrix} \right| \neq 0. \quad (25)$$

Вектор  $x$  находится из следующего соотношения

$$x = B \begin{pmatrix} CB \\ \dots \\ D \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y \\ \dots \\ z \end{pmatrix}. \quad (26)$$

**Стабилизация рабочей точки нелинейного ТП.** Вернемся к исходной задаче – стабилизации рабочей точки  $(x^*, u^*)$  статической системы (2) с интегрирующим регулятором (3). Сведем задачу к уже решенной ЛКЗ. Для этого продифференцируем систему (2) в окрестности рабочей точки ТП. В результате получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами

$$\dot{x} = - \left[ \left( \frac{\partial^* f}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial^* f}{\partial u} \right] \delta, \quad (27)$$

где  $\frac{\partial^* f}{\partial x}$  и  $\frac{\partial^* f}{\partial u}$  – матрицы Якоби, вычисленные в рабочей точке  $x^*, u^*$ .

Применяя к (27) методику синтеза матричного коэффициента усиления в контуре обратной связи, получим устойчивую линейную систему. Поскольку последняя является системой первого приближения к исходной нелинейной, то в соответствии с известной теоремой Ляпунова об устойчивости по первому приближению исходная нелинейная система в точке  $x^*, u^*$  также будет устойчива.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– использование интегрирующего регулятора положения равновесия многомерной статической системы, синтезированного на основе решения ЛКЗ оптимального управления, позволяет обеспечить асимптотическую устойчивость процесса стабилизации для любых положительных матриц критерия качества;

– предложенная система стабилизации рабочей точки технологического процесса работоспособна только в случае использования информации о всех компонентах вектора выхода;

– информация о векторе выхода может быть получена на основе измерений различных компонент вектора входа и вектора выхода при выполнении критерия наблюдаемости (25).

**Список литературы:** 1. Анисимов И. В. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности / И. В. Анисимов. – Л. : Химия, 1967. – 408 с. 2. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Технологический принцип формализации / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М. : Наука, 1979. – 394 с. 3. Профос П. Регулирование паросиловых установок / П. Профос. – М. : Энергия, 1967. – 368 с. 4. Балакирев В. С. Оптимальное управление процессами химической технологии / В. С. Балакирев, В. М. Володин, А. М. Цилин. – М. : Химия, 1988. – 384 с. 5. Андреев Ю. Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю. Н. Андреев. – М. : Наука, 1976. – 424 с. 6. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. – 575 с. 7. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М. : Наука, 1982. – 272 с. 8. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 911 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Anisimov I. V. *Osnovy avtomaticheskogo upravlenija tehnologicheskimi processami neftehimicheskoi i neftepererabatyvajushhej promyshlennosti*. Leningrad: Himija, 1967. Print. 2. Kafarov V. V., I. N. Dorohov. *Sistemnyj analiz processov himicheskoi tehnologii. Tehnologicheskij princip formalizacii*. Moscow: Nauka, 1979. Print. 3. Profos P. *Regulirovanie parosilovyh ustanovok*. Moscow: Jenergija, 1967. Print. 4. Balakirev V. S., V. M. Volodin and A. M. Cilin. *Optimal'noe upravlenie processami himicheskoi tehnologii*. Moscow: Himija, 1988. Print. 5. Andreev Ju. N. *Upravlenie konechnomernymi linejnymi ob#ektami*. Moscow: Nauka, 1976. Print. 6. Gantmaher F. R. *Teorija matric*. Moscow: Nauka, 1967. Print. 7. Lankaster P. *Teorija matric*. Moscow: Nauka, 1982. Print. 8. Gudvin G. K., S. F. Grebe and M. Je. Sal'gado *Proektirovanie sistem upravlenija*. Moscow: BINOM. Laboratorija znanij, 2014. Print.

Поступила (received) 09.12.2015

**Куценко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

**Kutsenko Alexander Serhiyovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Systems Analysis and Control National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

**Коваленко Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры системного анализа и управления; тел.: (057) 707-66-54; e-mail: kovalsvt@rambler.ru.

**Kovalenko Sergey Vladimirovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of Systems Analysis and Control; tel.: (057) 707-66-54; e-mail: kovalsvt@rambler.ru.

**Товажнянский Владимир Игоревич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskiyi@mail.ru.

**Tovagnyansky Vladimir Igorevych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskiyi@mail.ru.

**В. П. СЕВЕРИН, Л. В. ОВЕРЬЯНОВА, О. В. ОМЕЛЬЯНЕНКО**

## УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ ПИТАНИИ ОТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ИНЕРЦИОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Рассматривается пригородный электропоезд с асинхронными тяговыми двигателями и бортовыми накопителями энергии. Предложена система управления перетоком мощности в исследуемом тяговом приводе с накопителем при питании от контактной сети. Показана стратегия системы управления, заключающаяся в обеспечении компенсации излишков или нехватки мощности тягового инвертора за счет управления током накопителя. Предложенная система управления потоком мощности позволит рекуперировать энергию в накопитель до полной остановки электроподвижного состава.

**Ключевые слова:** пригородный электропоезд, асинхронный электродвигатель, электромеханический инерционный накопитель энергии, тяговый инвертор, DC-DC преобразователь, система управления.

**Введение.** Одним из решений проблемы энергосбережения в области железнодорожного транспорта является применение накопителей энергии на борту электроподвижного состава (ЭПС).

Для питания тягового привода с накопителем энергии (НЭ) может быть одновременно использован ток, поступающий как от токоприемника, так и от бортового НЭ. Энергия рекуперации во время торможения может быть возвращена в контактную сеть и одновременно передана на устройство НЭ. При работе ЭПС согласно ситуации могут автоматически изменяться соотношения потока мощности между контактной сетью и бортовым НЭ.

На начальных этапах исследования были рассмотрены режимы работы схемы тягового привода ЭПС с НЭ без участия контактной сети и определена энергоэффективность предлагаемой системы [1]. Поскольку при этом процессы обмена энергией являются частными случаями более общего процесса, целесообразно рассмотреть схему с участием контактной сети и предложить систему управления процессом обмена энергией между тяговыми электродвигателями, НЭ и контактной сетью.

**Концепция ЭПС с НЭ.** В качестве базового электропоезда рассмотрен четырехвагонный электропоезд сочлененного типа для пригородного сообщения, в котором два вагона моторных и два прицепных (рис. 1). Концы смежных промежуточных вагонов этого электропоезда должны опираться на тележки Якобса, а головные части концевых вагонов – на обычные двухосные моторные тележки. Система электроснабжения постоянного тока 3300 В. Количество тяговых двигателей – 4. Максимальная скорость поезда – 120 км/ч.

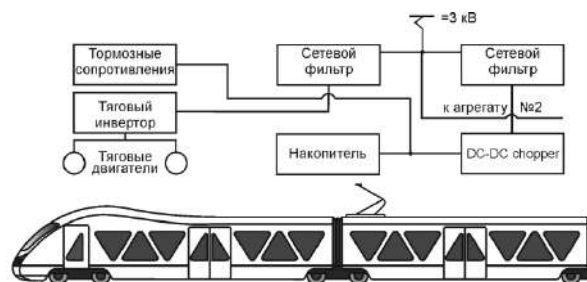


Рис. 1 – Схема размещения оборудования базового поезда

В системе тягового электропривода предусмотрен электромеханический инерционный накопитель энергии, который в режиме торможения запасает кинетическую энергию поезда, чтобы впоследствии при разгоне выдавать ее в тяговую цепь как совместно с контактной сетью, так без ее участия. Учитывая то, что режимы разгона и торможения для электропоездов пригородного сообщения являются штатными, эффект существенного энергосбережения от применения накопителя вполне ожидаем.

**Схема тягового электропривода ЭПС с НЭ. Тяговая цепь.** Тяговый привод электропоезда, состоящий из двух идентичных тяговых агрегатов, получает питание через аппаратуру защиты от одного из двух токоприемников, соединенных между собой высоковольтным кабелем. Тяговый агрегат, схема которого приведена на рис. 2, содержит две параллельно включенных цепи. Каждый из преобразователей имеет прямое подключение к контактной сети через входной фильтр.

Реверсивный повышающе-понижающий преобразователь (DC-DC – chopper), расположенный перед накопителем энергии, представляет собой четырехквadrантный обратимый конвертор, который может обеспечить повышающий коэффициент преобразования в 3–4 единицы [2].

Тяговый преобразователь, обеспечивающий регулирование величины момента и частоты вращения асинхронных двигателей, представляет собой автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), созданный на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Основным исполнительным механизмом тягового привода являются асинхронные двигатели. АИН с конвертором соединены параллельно, чтобы распределять поток электрической энергии на привод и хранение. Процессы заряда и разряда накопителя предусмотрены при напряжении на нем около 1000 В и напряжении в контактной сети 3300 В. Любые излишки или недостатки электроэнергии от уровня, необходимого или недостатка электроэнергии от уровня, необходимого или недостатка электроэнергии от уровня, будут сняты с накопителя или переданы в него конвертором по сигналу цепи управления.

Преимущество такой схемы заключается в том, что она может быть использована на существующих поездах с управляемыми инверторами.

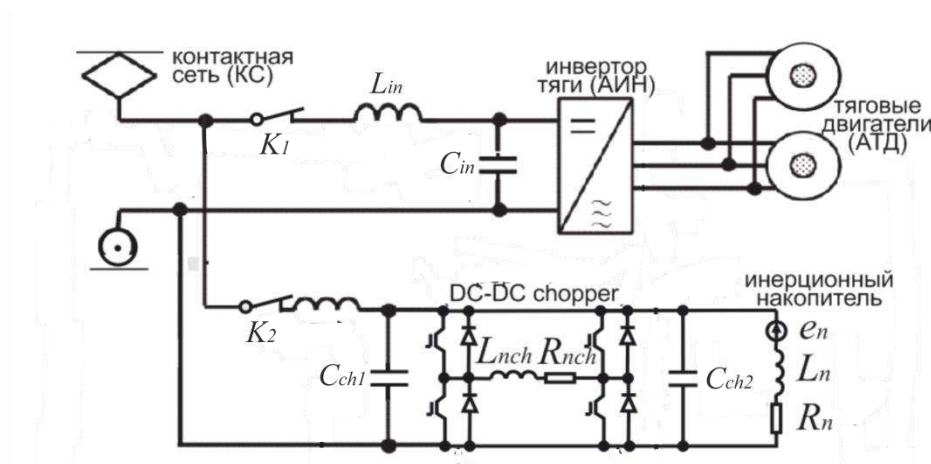


Рис. 2 – Структурная схема тягового агрегата:

$K_1, K_2$  – ключи;  $L_{in}, L_{ch}, C_{in}, C_{ch1}, C_{ch2}$  – индуктивности и емкости сетевых фильтров;  
 $L_{nch}, R_{nch}$  – индуктивность и активное сопротивление DC-DC chopper;  
 $e_n, L_n, R_n$  – ЭДС, индуктивность и активное сопротивление накопителя

*Устройство бортового накопителя энергии.* При выборе параметров устройства накопителя энергии, было учтено значение кинетической энергии и максимальной мощности движущегося поезда.

Для пригородного поезда с четырьмя вагонами – двумя моторными и двумя прицепными – рекуперативное торможение от скорости 70 км/ч до полной остановки может быть достигнуто применением накопителя энергии для каждого моторного вагона с энергией обмена 12 МДж при мощности 500 кВт.

Накопитель представляет собой сочетание маховика (аккумулятора) и системы электромеханического преобразователя энергии (СЭМПЭ) в виде обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором [3].

При торможении электроподвижного состава энергия замедления его массы преобразуется накопителем в кинетическую энергию вращения маховика, а при разгоне кинетическая энергия маховика передается в систему тягового привода, нагрузкой которого является масса подвижного состава.

Когда СЭМПЭ работает в режиме двигателя, накопитель запасает энергию, и частота вращения ротора увеличивается. Накопитель выдает энергию, когда СЭМПЭ переходит в режим генератора и частота вращения ротора снижается. Уровень запасенной накопителем энергии зависит от момента инерции ротора и частоты его вращения. Уровень мощности определяется параметрами СЭМПЭ, а также системой управления – как коммутатором СЭМПЭ, так и общей системой управления накопителем.

Описанная выше схема электропривода позволяет использовать для тяги ток, поступающий как из контактной сети, так и от накопителя энергии. При рекуперации энергия торможения может быть возвращена в контактную сеть и одновременно запасена в накопителе.

Распределение потока электрической энергии на привод и хранение происходит за счет параллельного включения инвертора тяги и реверсивного преобразователя, обеспечивающего двустороннее протекание тока. Реализовать это возможно специальной системой автоматического управления, которая исключит приток энергии от контактной сети к накопителю при рекуперации, и ее отток от накопителя в контактную сеть в режиме тяги. Требуемый эффект может быть достигнут за счет динамического изменения пороговых значений для напряжений инвертора тяги и реверсивного преобразователя, а также предельных значений тока контактной сети [4]. Подобный принцип дает возможность рационально перераспределять потоки энергии как внутри системы тягового привода отдельного поезда в зависимости от места его нахождения относительно тяговых подстанций, так и при выезде или торможении других поездов, находящихся на этой зоне.

#### Управление процессом обмена энергией при энергообеспечении и рекуперации.

*Работа схемы электропривода ЭПС с НЭ при отключенной контактной сети.*

На начальных этапах исследования был рассмотрен частный случай, когда контактная сеть не принимала участия в процессах обмена энергией между накопителем и тяговыми двигателями. При этом автоматическое управление процессом обмена энергией осуществлялось по трем каналам с помощью АИН тягового двигателя путем ШИМ, внутренним коммутирующим устройством накопителя и конвертором НЭ при его пропорциональном регулировании.

В качестве допущения было принято, что напряжение и ток на входе в автономный инвертор напряжения и конвертор – суть одни и те же величины. В этом случае математические модели процессов обмена энергией выглядят следующим образом.

При торможении (рекуперация):



$$\begin{cases} \frac{di_n}{dt} = \frac{U_z k - e_n - i_n (R_n + R_{nch})}{L_n + L_{nch}}; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \frac{U_z k i_n}{v_{ps}} - f_w; \\ \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot \frac{e_n i_n}{w_n}. \end{cases}$$

При разгоне (тяга):

$$\begin{cases} \frac{di_n}{dt} = \frac{e_n k - U_z - i_n k (R_n + R_{nch})}{k(L_n + L_{nch})}; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = K_v \frac{U_z i_n}{v_{ps} k} - f_w; \\ \frac{dw_n}{dt} = -K_w \cdot \frac{e_n i_n}{w_n}, \end{cases}$$

где  $i_n$  – ток в цепи накопитель-двигатель;  
 $U_z$  – напряжение звена постоянного тока;  
 $k$  – пропорциональный коэффициент регулирования конвертора;  
 $v_{ps}$  – скорость ЭПС;  
 $w_n$  – частота вращения ротора НЭ;  
 $\eta_{dv}, \eta_{pr}, \eta_{ch}, \eta_n$  – к.п.д. тягового двигателя, тяговой передачи, конвертора и накопителя;  
 $m_{ps}$  – масса ЭПС;  
 $B_{sr}$  – среднее значение магнитной индукции НЭ;  
 $C_{em}, C_{mn}$  – геометрические постоянные НЭ;  
 $J$  – момент инерции НЭ;  
 $f_w$  – сопротивление движению ЭПС;  
 $K_v, K_w$  – коэффициенты:

$$K_v = \frac{\eta_{dv} \eta_{pr}}{\eta_{ch} m_{ps}}, \quad K_w = \frac{C_{mn} B_{sr} \eta_n}{J}.$$

Результаты расчетов основных показателей, характеризующих работу исследуемого тягового привода в режимах торможения и разгона, показаны на рис. 3.

Таким образом, в рассмотренном частном случае при указанных каналах регулирования накопитель утилизирует порядка 60% энергии торможения ЭПС. До 47% этой энергии используется повторно при разгоне поезда. В итоге на каждом цикле «торможение – стоянка – разгон» экономится до 28% энергии. Эти показатели энергоэффективности можно повысить за счет более сложных и рациональных систем управления потоками мощности в тяговом приводе при участии контактной сети.

Работа схемы электропривода ЭПС с НЭ при подключенной контактной сети.

Для проведения дальнейших исследований необходимо рассмотреть схему, при которой питание тягового двигателя обеспечивается от контактной сети и НЭ. При этом необходимо разработать систему управления, которая бы не имела проблем с функционированием, а также была надежна в обслуживании (рис. 4).

Основная стратегия такой системы управления состоит в обеспечении компенсации излишков или нехватки мощности инвертора тяги за счет управления током накопителя по информации о режимах работы инвертора тяги и значениях напряжения на входе конвертора  $u_{ch}$ .

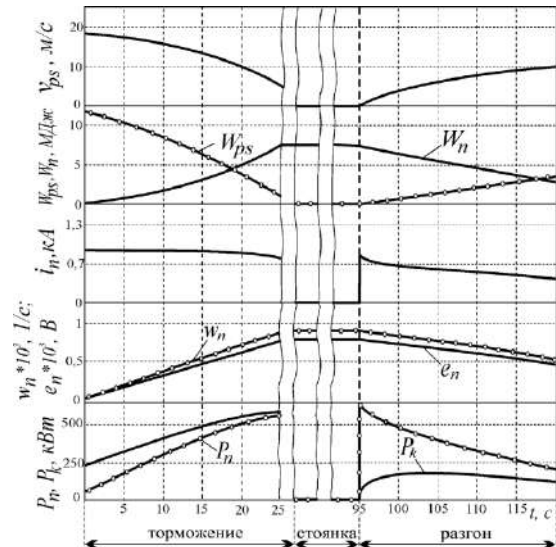


Рис. 3 – Процессы обмена энергией в тяговом приводе:  
 $W_{ps}$  – энергия подвижного состава;  $W_n$  – энергия накопителя;  
 $P_k$  – мощность на колесе;  $P_n$  – мощность накопителя

Эта схема работает следующим образом. Преобразовав пропорционально-интегральным звеном PI разницу тока контактной сети  $\Delta i_p = i_p - i_{p \lim}$  во входное пороговое напряжение конвертора  $u_{ch}^*$ , мы можем управлять этим напряжением по току контактной сети  $i_p$ . Это позволяет предотвратить нежелательный отток тока из НЭ в контактную сеть в режиме тяги или нежелательный приток тока из контактной сети к НЭ в режиме рекуперации.

Информация о токе контактной сети, будучи корректируемой, представляет собой средство предотвратить вышеупомянутые нежелательные перетоки энергии между контактной сетью и НЭ. При равенстве ограничителя тока в контактной сети нулю ( $i_{p \lim} = 0$ )  $i_p \geq 0$  – отток мощности от накопителя к контактной сети в режиме тяги отсутствует, а при  $i_p \leq 0$  – отсутствует приток мощности от контактной сети к НЭ в режиме рекуперации.

Требуемый переток энергии между контактной сетью и накопителем может быть достигнут путем динамического изменения порогового напряжения конвертора  $u_{ch}^*$  и ограничителя тока контактной сети  $i_{p \lim}$ .

Работа конвертора не связана с изменениями напряжения на токоприемнике. При ограничении максимального и минимального тока накопителя  $i_n$  первостепенное значение уделяется обмену мощности между накопителем и инвертором тяги, и только излишек или нехватка этой мощности приводит к ее перетокам между контактной сетью и инвертором тяги.

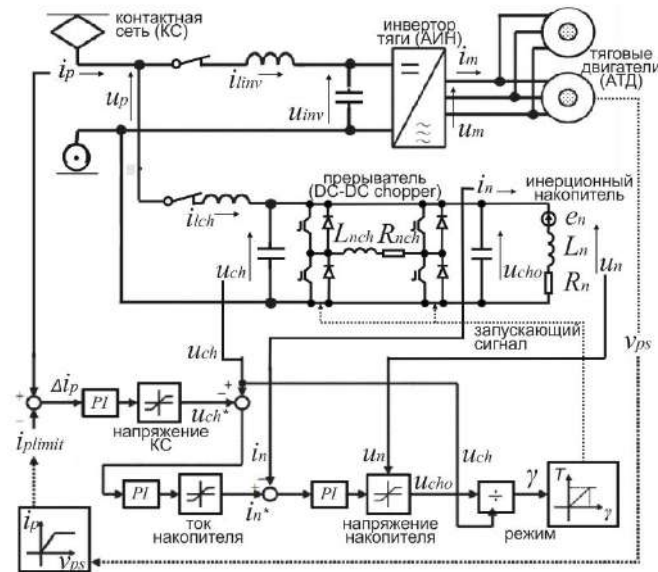


Рис.4 – Принципиальная схема тягового привода и системы управления для ЭПС с НЭ

**Выводы.** Таким образом, для достижения более высоких показателей энергоэффективности работы электроподвижного состава необходимо введение в его тяговый привод бортового накопителя энергии. Удовлетворительная работа исследуемой системы требует реализации алгоритма управления, который исключит приток энергии от контактной сети к накопителю при рекуперации, и ее отток от накопителя в контактную сеть в режиме тяги. Предложенная система управления позволит осуществлять рекуперацию до нулевой скорости движения подвижного состава.

**Список литературы:** 1. Омеляненко В.И. Повышение эффективности работы бортового электромеханического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе пригородного электропоезда / В.И. Омеляненко, Л.В. Оверьянова // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – № 3. – С. 9–14. 2. Zhang J. Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control: Dis. ... for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering / J. Zhang – Virginia, 2008. – 214 p. 3. Омеляненко В.И. Инерционный накопитель энергии – перспективная технология энергосбережения для электроподвижного состава /

В.И. Омеляненко, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения*. – 2013. – № 1(65). – С. 38–54. 4. Masamichi O. Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles Using Trolley Power and On-board Batteries / O. Masamichi, T. Yoshiaki // *QR of RTRI*. – Vol. 48, №1. – 2007, Feb. – P.30–36.

**Bibliography (transliterated):** 1. Omel'janenko, V. I. and L. V. Over'janova. "Povyshenie jeffektivnosti raboty bortovogo jelektromehaničeskogo inercionnogo nakopitelja jenerгии v tjagovom privode prigorodnogo jelektropoezda." *Zal'iznychnyy transport Ukrainy*. No. 3. 2015. 9–14. Print. 2. Zhang, J. *DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control. Dis. ... for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering*. Virginia, 2008. Print. 3. Omel'janenko, V. I., E. S. Rjabov and L. V. Over'janova. "Inercionnyj nakopitel' jenerгии – perspektivnaja tehnologija jenergosberezhenija dlja jelektropodvizhnogo sostava." *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktor'skogo instituta jelektrovozostroenija*. No. 1(65). 2013. 38–54. Print. 4. Masamichi, O., and T. Yoshiaki. "Power Flow Control for Hybrid Electric Vehicles Using Trolley Power and On-board Batteries." *QR of RTRI*. No. 1. Vol. 48. 2007. 30–36. Print.

Поступила (received) 09.12.2015

**Северин Валерий Петрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и управления; тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Severin Valeriy Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Professor at the Department of Systems Analysis and Control; tel.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Оверьянова Лилия Викторовна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрического транспорта и тепловозостроения; тел.: (066) 839-81-87; e-mail: de-over@rambler.ru.

**Overyanova Liliya Viktorovna** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Assistant Professor at the Department of electrical transport; tel.: (066) 839-81-87; e-mail: de-over@rambler.ru.

**Омеляненко Ольга Владимировна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студентка; тел.: (050) 969-37-72; e-mail: olha.omelianenko@gmail.com.

**Omeljanenko Olga Vladimirovna** – National Technical University University «Kharkov Polytechnic Institute», student; tel.: (050) 969-37-72; e-mail: olha.omelianenko@gmail.com.



*А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК, А. Ю. СИДОРЕНКО, И. А. ЧЕРТИЩЕВ*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПАДАЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ФОРМИРУЕМОГО МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ

Представлены результаты исследований и расчетов по формированию и управлению радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ, и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля управляющего магнита. Приведены результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока. Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента. Показана возможность регулировки места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, магнитное поле, численное моделирование электронного потока, управление радиального электронного пучка.

**Введение.** В настоящее время во многих странах разрабатываются и внедряются в промышленное производство пучковые методы обработки материалов потоками энергии. Для решения этих задач широко используются ускорители интенсивных электронных пучков с энергией электронов 100...400 кэВ [1, 2]. В данном направлении можно выделить ряд актуальных задач, например, модификация поверхностных свойств металла с целью изменения их микроструктуры и фазового состава путем поверхностной обработки металлов электронным пучком [3]. Так, например, при обработке электронным пучком некоторых типов сталей, применяемых в автомобильной промышленности, получено увеличение микротвердости от 2 до 5 раз и, соответственно, срока службы. Обработка электронным пучком лопаток газовых турбин позволяет увеличить срок службы в 2–2,5 раза [4]. Решение подобных задач управления электронным пучком требует реализации нужной геометрии магнитного поля для формирования устойчивого пучка электронов при его передаче вдоль канала ускорителя.

В НИЦ ХФТИ был создан ускоритель электронов [5] на основе магнетронной пушки с металлическим холодным вторичноэмиссионным катодом. Принцип таких пушек основан на вторичноэмиссионном размножении электронов, образовании электронного облака и формировании электронного пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях [3, 5].

**Целью** настоящей работы является изучение распределения частиц по вертикальной оси  $Z$  (прямая задача) и регулирование этого распределения с помощью управляющего магнитного поля дополнительного соленоида (обратная задача).

**Постановка задачи.** В работе рассматривается пучок электронов с энергией  $E$ , начинающих движение параллельно оси  $Z$  на некотором расстоянии  $R_0$  от неё. Частицы формируются магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, после чего подвергаются действию магнитного поля, создаваемого заданным набором соленоидов. В дополнительном соленоиде путем вариации тока в его обмотке создается градиент поля, приводящий к изменению траекторий частиц. Место достижения

заданного радиуса  $R_U$  фиксируется и определяется значение координаты  $Z_U$ . Требуется определить координату  $Z_U$  как функцию заданного радиуса  $R_U$ .

**Методы исследования.** Проведены исследования по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом и измерению его параметров при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле соленоида [3, 5]. Источник электронов размещается в вакуумном объеме. Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 38 мм. Магнитное поле для генерирования и транспортировки электронного пучка создается соленоидом, состоящим из 4 секций. Питание секций осуществляется от источников постоянного тока. Регулируя ток в каждой из катушек, можно изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка. Это позволило получать различные режимы формирования электронного пучка. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из 14 медных колец с внутренним диаметром ~66 мм и, находящейся на расстоянии ~85 мм от среза магнетронной пушки. Ширина колец составила 8 мм, а расстояние между ними – 1,5 мм. Для измерения азимутальной однородности радиального электронного пучка 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента. Система находилась в магнитном поле, создаваемом соленоидом. Кроме того, для создания локального изменения скорости спада магнитного поля соленоида использовалось рассеянное магнитное поле, которое создавалось кольцевыми магнитами из  $\text{SmCo}_5$ , размещенными на оси системы за 14-м кольцом.

Эксперименты проводились для случая, когда направление полей кольцевых магнитов и соленоида было встречное при напряжениях на катоде 30...70 кВ. Градиент спада магнитного поля изменялся от 50 Ое/см до 300 Ое/см.

**Математическая модель исследования.** Математическую модель данной задачи можно рассматривать на основе гамильтониана, который в цилиндрической системе координат  $(r, z, \theta)$  имеет вид

$$H = \frac{p_r^2 + p_z^2}{2m} + \frac{1}{2m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 A \right)^2, \quad (1)$$

где  $e_0$ ,  $m$  – заряд и масса покоя электрона;  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\vartheta$  – канонические импульсы;  $A$  – магнитный потенциал.

Данный магнитный потенциал с учетом азимутальной симметрии пока запишем в виде  $A(r, z) = Brf(z)$ , где  $f(z)$  – функция продольной координаты;  $B$  – напряженность магнитного поля в выбранной рассматриваемой точке. Функция магнитного поля  $A(r, z)$  может задаваться как из теоретических допущений, так и на основе эмпирических наблюдений. При численных расчетах в процессе выполнения пошаговых алгоритмов необходимо каждый раз для текущей координаты  $z$  задавать значение этой функции  $A(r, z)$ , а также определять значение её производной  $\partial A(r, z) / \partial z$ .

В общем случае формулировка начальных условий вместе с гамильтонианом, включающим магнитный потенциал  $A(r, z)$ , оказывается достаточной для решения прямой задачи о построении траектории частицы и, тем самым, для решения прямой задачи о динамике электронного пучка. С другой стороны, целенаправленно регулируя распределение магнитного поля (см. рис. 1), оказывается возможным управлять параметрами результирующего пучка.

Для канонических импульсов  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\vartheta$  запишем:  $p_r = m\dot{r}$ ,  $p_z = m\dot{z}$ ,  $p_\vartheta = mr^2\dot{\vartheta}$ , где точкой над переменными обозначено дифференцирование по текущему времени. Используем гамильтонову форму уравнений движения для координат и импульсов электрона, имеющих общий вид

$$\begin{cases} \dot{r} = \partial H / \partial p_r, \\ \dot{z} = \partial H / \partial p_z, \\ \dot{\vartheta} = \partial H / \partial p_\vartheta, \\ \dot{p}_r = -\partial H / \partial r, \\ \dot{p}_z = -\partial H / \partial z, \\ \dot{p}_\vartheta = -\partial H / \partial \vartheta. \end{cases} \quad (2)$$

Это дает

$$\begin{cases} \dot{r} = p_r / m, \\ \dot{z} = p_z / m, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{mr} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right), \\ \dot{p}_r = \frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( \frac{p_\vartheta}{r^2} + e_0 Bf(z) \right), \\ \dot{p}_z = \frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( e_0 Br \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В результате дифференцирования (3) получаем уравнения для координат, а также для канонических импульсов, в которых выбирается в качестве постоянной амплитуды  $B$  некоторое значение магнитного

поля на оси соленоида, например, его максимальное значение. Примем во внимание, что в системе уравнений (3) фигурируют величины, значения которых отличаются на многие порядки. С целью уравновесить эти десятичные порядки перейдем, используя скорость света  $c$ , от текущего времени  $t$  к переменной  $s = ct$ . Эту переменную можно интерпретировать как пройденный путь частицей, а производную по  $s$  будем обозначать штрихом. Кроме этого, для канонических импульсов  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\vartheta$  осуществим замену  $p_r = e_0 B q_r$ ,  $p_z = e_0 B q_z$ ,  $p_\vartheta = e_0 B q_\vartheta$ . К дифференциальным уравнениям (3) необходимо присоединить начальные условия для  $r_0$ ,  $z_0$ ,  $\vartheta_0$ , а также для  $q_{r0}$ ,  $q_{z0}$ ,  $q_{\vartheta 0}$ . В каждой из строк системы (3) можно выделить ларморовский множитель  $\mu = e_0 B / mc$ , а также  $f(z)$  – функцию продольной координаты, и, соответственно,  $Bf(z)$  – функцию, описывающую напряженность магнитного поля вдоль оси  $z$ . Амплитуду  $B$  удобно один раз выбрать таким образом, чтобы можно было пользоваться функцией  $Bf(z)$  на всем интервале возможных значений  $z$ . Кроме того, будем считать, что на основании опытных данных построены функции  $f(z)$  и  $\partial f(z) / \partial z$ , описывающие магнитное поле на оси соленоида.

При построении вычислительного алгоритма необходимо обеспечить с одной стороны его безусловную сходимость, а с другой стороны – быстроту его временной реализации, для того, чтобы провести моделирование для достаточно большого количества частиц (порядка 1000).

Устойчивость численного алгоритма решения связана с пространственным шагом интегрирования  $\Delta s$  и ларморовским параметром  $\mu$ . При выполнении условия  $\mu \Delta s \ll 1$  можно ожидать сходимость численного решения системы (3) к его аналитическому аналогу. Поскольку  $e_0 / mc = 586.69$ , то при  $B = 0.2$  Тл, получим  $e_0 B / mc = 117.34$  м<sup>-1</sup>. Тогда условие  $\mu \Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. Теперь с вычислительной точки зрения, задача может быть сформулирована как задача Коши, т.е. задача нахождения решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Результатом будет являться траектория электрона (пучок таких траекторий), отвечающий множеству начальных условий. Потребовав выполнения заданного условия (например, достижение радиальной компонентой  $r$  некоторого значения  $R_U$ ), можно, зафиксировав значения других компонент траектории электрона, сформировать результирующий пучок и изучить его свойства.

**Результаты численного моделирования.** На рис. 1 приведены два распределения продольного магнитного поля (рис. 1, а–б) вдоль оси магнетронной пушки и в канале транспортировки пучка. На рис. 1, в–г приведено семейство из пяти траекторий электронов для этих распределений магнитного поля.

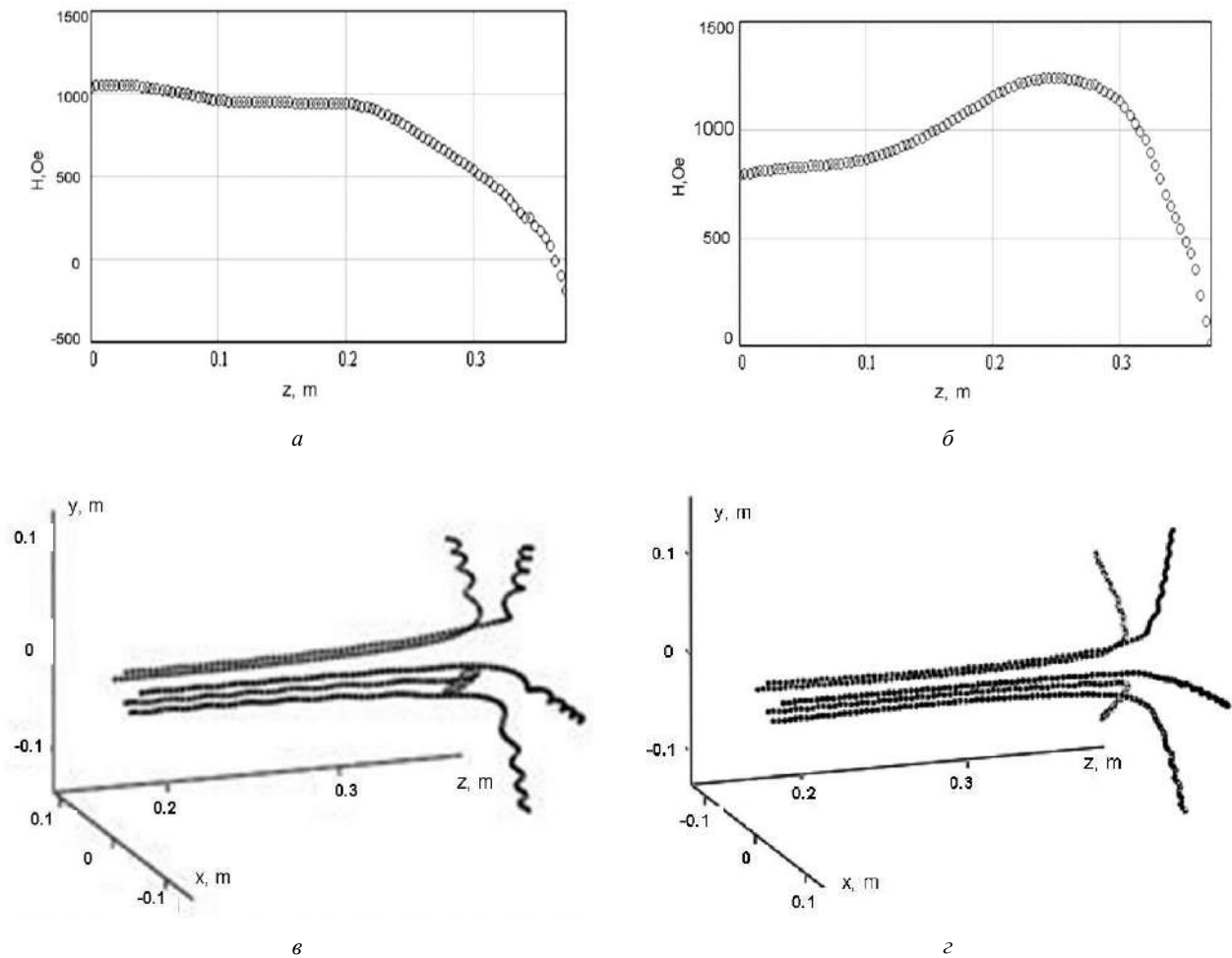


Рис. 1 – Распределение магнитного поля вдоль оси системы и канала транспортировки пучка (а, б) и траектории электронов (в, г) для этих распределений магнитного поля

Начальные значения у этих частиц статистически одинаковы, кроме значений по  $\vartheta_0$ , которые равномерны на  $(0, 2\pi)$ . Частицы пучка инжектировались с начальным радиусом  $r_0$ , равномерно распределенным от 18 мм до 20 мм. Видно, что частицы, пролетев однородную область магнитного поля, по мере прохождения области его спада разворачиваются по радиусу. При этом, частицы испытывают прецессию вокруг силовых линий магнитного поля, обусловленную начальными условиями. Напряжение на катоде составляло  $\sim 42$  кВ.

Зафиксируем теперь момент, когда радиальная компонента достигнет значения  $R_U = 33$  мм. При достижении каждым электроном этого уровня в данный момент формируется массив продольных координат  $Z_U$ . На рис. 2, а–б приведены две расчетные гистограммы  $G(Z_U)$  электронов при достижении ими порогового радиуса  $R_U$ . Данные гистограммы были рассчитаны для двух зависимостей амплитуд магнитного поля, соответствующих приведенным на рис. 1, а–б. Соответствующие распределения токов на измерительных ламелях показано на рис. 2, в–г. Как видно из рис. 2, г, при

таком распределении магнитного поля  $\sim 70\%$  тока пучка в радиальном направлении попадало на одно кольцо шириной 8 мм. Ток в радиальном направлении регистрировался с 14-го по 11-е кольца. Градиент спада магнитного поля в районе 14-го кольца составил  $\sim 280$  Oe/cm при напряженности магнитного поля  $\sim 400$  Oe. Сопоставляя данные рис. 2, можно заключить о хорошем соответствии координат сканирования пучком при  $R_U = 33$  мм. Исследования показали, что при уменьшении градиента спада поля до  $\sim 110$  Oe/cm, в области 14-го кольца, ток в радиальном направлении на кольцо уменьшился на  $\sim 80\%$ . При этом увеличились токи в радиальном направлении с 13-го кольца по 10-е кольцо соответственно. Изменяя амплитуду и распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка можно было управлять током вдоль длины колец.

При распределении магнитного поля (рис. 1, а) максимум тока смещался с 14-го кольца на 11-е и составил  $\sim 35\%$  тока пучка. Градиент спада магнитного поля в области 11-го кольца составил  $\sim 100$  Oe/cm при напряженности магнитного поля на середине кольца  $\sim 300$  Oe.

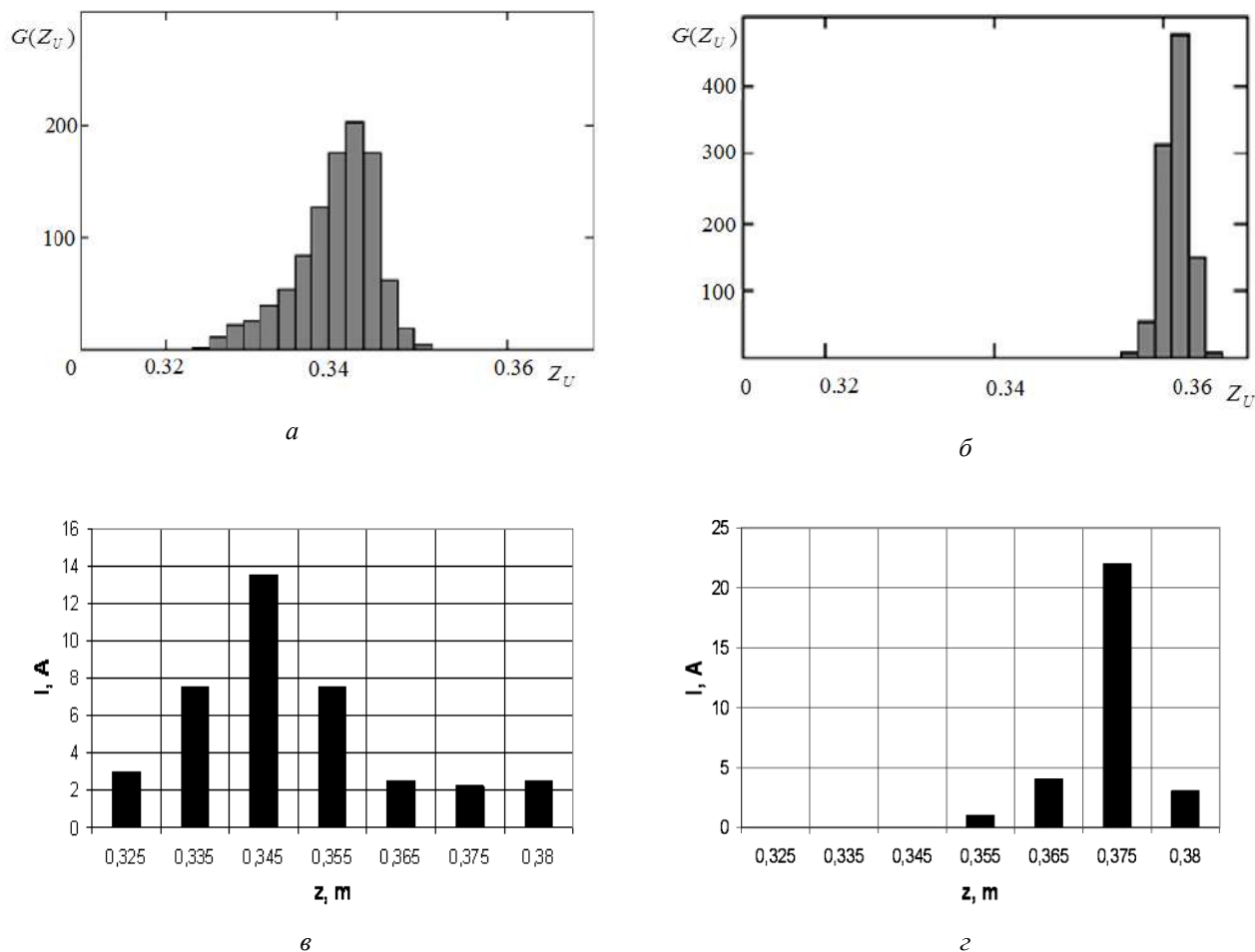


Рис. 2 – Расчетные гистограммы значений  $Z_U$  электронов при достижении ими порогового радиуса  $R_U$  (а, б) и экспериментальные распределения токов на измерительных ламелях (в, з)

**Выводы.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований и моделирующих расчетов по формированию и управлению радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...70 кэВ, и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля управляющего постоянного магнита. Приводятся результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока.

Показано, что величина тока и его распределение вдоль длины колец зависит от амплитуды распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада магнитного поля. Получено, что при выбранных начальных условиях для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого около сантиметра.

Полученные результаты моделирования согласуются с данными эксперимента. Показана возможность регулирования места попадания пучка на вертикальную стенку при изменении амплитуды управляющего магнитного поля.

**Список литературы:** 1. Engelko V. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment / V. Engelko, G. Mueller, A. Andreev et al. // Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry. – St.-Petersburg, Russia. – 2001. – P. 412–417. 2. Школьников Э. Я. Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей / Э. Я. Школьников // Тр. XI Международного совещания применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. – Санкт-Петербург, Россия. – 2005. – С. 126–128. 3. Быстров П. А. Методика и программа «Bean scanning» расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром / П. А. Быстров, Н. Е. Розанов // ВАНТ. – 2012. – №4, 80. – С. 87–91. 4. Довбня А. Н. Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1% Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки / А. Н. Довбня, С. Д. Лавриненко, В. В. Закутин и др. // ВАНТ. Серия «Физика радиационного материаловедения». – 2011. – № 2(72), вып. 97. – С. 39–45 5. Глухих В. А. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков / В. А. Глухих, О. П. Печерский, В. И. Энгелько, Б. П. Яценко // Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1–4 октября 2001. – С. 445–447. 6. Довбня А. Н. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником / А. Н. Довбня, В. В. Закутин, Н. Г. Реуцетняк и др. // Вісник «ХНУ». Сер.: Ядра, частинки, поля. – 2006. – № 732, вып. 2(30). – С. 96–100.

**Bibliography (transliterated):** 1. Engelko V., G. Mueller, A. Andreev et al. "Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment."

*Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry.* (St.-Petersburg, Russia, 2001): 412–417. Print. **2.** Shkol'nikov E.Ya. "Sil'notochniy uskoritel' elektronov mikrosekundnoy dlitel'nosti dlya radiacionno-technologicheskikh celey." *Tr. XI Megdunarodnogo sovetshaniya primeneniya uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2005): 126–128. Print. **3.** Bistrov P. A. and N. E. Rozanov. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronnoy puchka s shirokim energeticheskim spektrom." *VANT.* No. 4, 80. 2012. 87–91. Print. **4.** Dovbnya A. N., S. D. Lavrinenko and V. V. Zakutin. "Modifikatsiya poverhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki." *VANT. Ser.:*

*Fizika radiacionnogo materialovedeniya.* No. 2 (72), vip. 97. (2011). 39–45. Print. **5.** Gluhih V. A., O. P. Pecherskiy, V. I. Engel'ko and B. P. Yacenko. "Modifikatsiya poverhnostnih svoystv materialov s pomotsh'yu motshnih impul'snih elektronnih puchkov." *Sbornik dokladov X Megdunarodnogo sovetshaniya po primeneniyu uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine.* (St.-Petersburg, Russia, 2001): 445–447. Print. **6.** Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya.* No. 732, vip. 2(30). 2006. 96–100. Print.

Поступила (received) 05.09.2015

**Мазманишвили Александр Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 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, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

**Решетняк Николай Григорьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков; тел.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

**Reshetnyak Mikola Grygorovych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, senior staff scientist National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

**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 Yuriyivna** – 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.

**Чертушцев Игорь Алексеевич** – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ведущий инженер, г. Харьков; тел.: (068) 992-96-32; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

**Chertyshev Igor Oleksiyovych** – National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", lead engineer, Kharkiv; tel.: (068) 992-96-32; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

УДК 621.3.078.001

**Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА**

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ ТАНКОВОЙ ЗЕНИТНОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривается задача отыскания значений варьируемых параметров системы наведения танковой зенитной установки закрытого типа, в которой зенитный пулемет установлен на вращающейся командирской башенке, а наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования. Показано, что качество работы системы наведения оценивается точностью поддержания заданной угловой скорости наведения, быстродействием и энергетическими затратами на наведение.

**Ключевые слова:** танковая зенитная установка, импульсная система регулирования, точность, быстродействие, энергетические затраты на наведение.

**Введение.** В украинских танках Т-64БМ «Булат», Т-80УД «Береза» и Т-84 «Оплот» нашли применение зенитные установки закрытого типа [1,2]. Зенитный пулемет калибром 12,7 мм установлен на командирской башенке. Наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования.

Схема электропривода танковой зенитной установки (ТЗУ) приведена на рис. 1, где приняты обозначения: КБ – командирская башенка; Р – редуктор; ИЭД – исполнительный электродвигатель; ТГ – тахогенератор обратной связи; ПН – пульт наведения; РН – реостат наведения; ЦЭБН – цифровой электронный блок наведения.

© Т. Е. Александрова, 2015

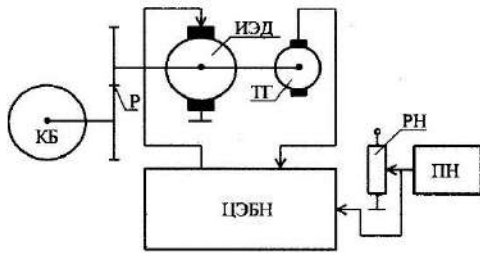


Рис. 1 – Электропривод наведения ТЗУ

ЦЭБН представляет собой широтно-импульсный модулятор (ШИМ) и формирует последовательность управляющих импульсов постоянной амплитуды  $U_0$ , передние фронты которых отстают друг от друга на величину  $T_0$ :

$$U_y(t) = \begin{cases} U_0 \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t)], & kT_0 \leq t < (k + \gamma)T_0; \\ 0, & (k + \gamma)T_0 \leq t < (k + 1)T_0, \end{cases} \quad (1)$$

причем скважность каждого управляющего импульса определяется соотношением

$$\gamma[kT_0] = \begin{cases} 1, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} \geq 1; \\ \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|}, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} < 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\theta$  – варьируемый параметр, подлежащий выбору;  $U_3[kT_0]$  – сигнал на входе РН в момент времени  $t = kT_0$ ;  $\sigma[kT_0]$  – сигнал ошибки ТЗУ в момент времени  $t = kT_0$ :

$$\sigma[kT_0] = U_3[kT_0] - U_\Gamma[kT_0], \quad (3)$$

где  $U_\Gamma[kT_0]$  – выходной сигнал ТГ.

**Целью настоящей статьи** является выбор значений варьируемых параметров системы наведения ТЗУ – передаточного отношения  $i_p$  редуктора Р, периода следования управляющих импульсов  $T_0$  и величины  $\theta$ , определяющей величину скважности управляющего импульса.

**Основная часть.** Используя результаты работы [1], математическую модель возмущенного движения объекта наведения ТЗУ представим в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_d(t)}{dt} &= \left[ \frac{c_M k_M}{J_\Sigma i_p^2} i_\alpha^2 - \frac{M_f(t)}{J_\Sigma i_p^2} \right] \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t)]; \\ \frac{di_\alpha(t)}{dt} &= \frac{r_\alpha}{l_\alpha} i_\alpha(t) - \frac{c_e k_M}{l_\alpha} i_\alpha(t) \times \\ &\quad \times \omega_d(t) \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t) + U_y(t)]; \\ \frac{dU_\Gamma(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_{ТГ}} U_\Gamma(t) + \frac{k_{ТГ}}{T_{ТГ}} \omega_d(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega_d(t)$  – угловая скорость вращения якоря ИЭД;  $i_\alpha(t)$  – ток цепи якоря ИЭД;  $M_f(t)$  – момент внешних возмущений, действующих на якорь электродвигателя;  $J_\Sigma$  – момент инерции командирской башенки с ТЗУ, боекомплектом и сидением командира танка с учетом массы командира относительно оси вращения башенки;  $i_p$  – передаточное отношение Р;  $c_M, c_e, k_M$  – постоянные конструктивные коэффициенты ИЭД;  $r_\alpha$  – активное сопротивление цепи якоря;  $l_\alpha$  – индуктивность цепи якоря;  $k_{ТГ}, T_{ТГ}$  – коэффициент усиления и постоянная времени тахогенератора цепи обратной связи.

Уравнения (4) совместно с соотношениями (1)–(3) представляют собой математическую модель возмущенного движения замкнутой системы наведения ТЗУ. Значения параметров ТЗУ положим равными:  $J_\Sigma = 0,51 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $c_M k_M = 0,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-2}$ ;  $r_\alpha = 0,42 \text{ Ом}$ ;  $l_\alpha = 0,001 \text{ Гн}$ ;  $c_e k_M = 0,0096 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $U_0 = 27 \text{ В}$ ;  $T_{ТГ} = 0,05 \text{ с}$ ;  $k_{ТГ} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$ .

В связи с тем, что момент, развиваемый ИЭД, намного превышает момент сопротивления  $M_f(t)$ , положим в математической модели (1)–(4)  $M_f(t) = 0$ . Рассмотрим зависимость характеристик системы наведения ТЗУ от величины передаточного отношения редуктора  $i_p$  и положим в математической модели  $U_3(t) = U_{30}(t) = 1 \text{ В}$ . Переходные процессы в системе наведения ТЗУ при нулевых начальных условиях уравнений (4) приведены на рис. 2.

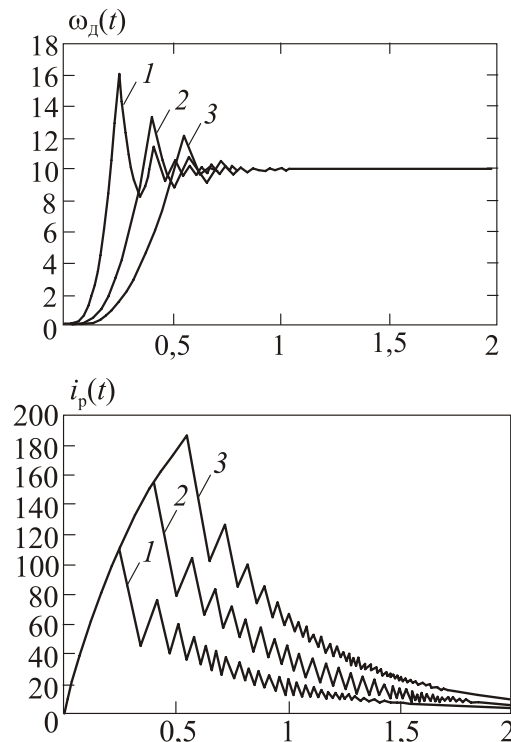


Рис. 2 – Переходные процессы в замкнутой системе: 1 –  $i_p = 0,1$ ; 2 –  $i_p = 0,2$ ; 3 –  $i_p = 0,3$

Анализ процессов, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы: **1)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к повышению точности стабилизации заданной скорости вращения якоря исполнительного двигателя; **2)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к уменьшению быстродействия системы регулирования; **3)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к возрастанию энергетических затрат на управление.

Из сказанного выше следует, что выбор передаточного отношения редуктора, связывающего исполнительный электродвигатель с погонем командирской башенки должен осуществляться из условия компромисса между тремя показателями, характеризующими эффективность ТЗУ – точностью, быстродействием и энергетическими затратами [3].

В работе [2] показано, что интегральный квадратичный функционал

$$I_1 = \int_0^T \sigma^2(t) dt \quad (5)$$

может служить количественной мерой точности и быстродействия наведения, а функционал

$$I_2 = \int_0^T i_{\text{я}}^2(t) dt \quad (6)$$

может служить количественной мерой энергетических затрат на наведение.

Между сформулированными требованиями существуют элементы противоречия, поэтому невозможно обеспечить одновременное достижение минимумов функционалов (5) и (6).

Введем в рассмотрение аддитивный функционал

$$I = \beta_1^2 I_1 + \beta_2^2 I_2 = \int_0^T [\beta_1^2 \cdot \sigma^2(t) + \beta_2^2 \cdot i_{\text{я}}^2(t)] dt \quad (7)$$

весовые коэффициенты которого  $\beta_1$  и  $\beta_2$  подлежат выбору. Требуется выбрать значение постоянного коэффициента  $\theta$ , при котором аддитивный функционал (7) достигает минимума.

Воспользовавшись результатами работы [4], для весовых коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  функционала (7) получаем следующие значения  $\beta_1 = 0,83$ ;  $\beta_2 = 0,17$ . На рис. 3 приведена зависимость значений аддитивного функционала (7), вычисленных на решениях математической модели (1)-(4) при различных значениях постоянной величины  $\theta$ . Анализ рис. 3 приводит к выводу, что минимальное значение аддитивного функционала (7) достигается при выборе  $\theta$  в интервале  $0,01 \leq \theta \leq 0,1$ .

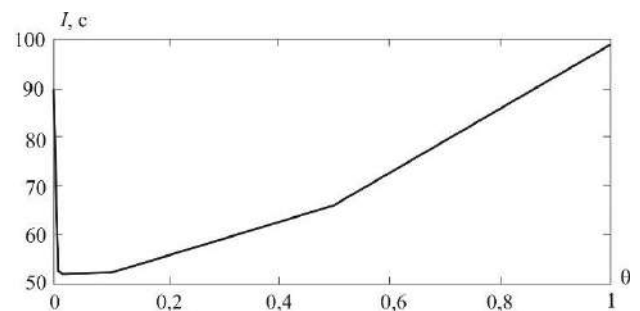


Рис. 3 – Зависимость функционала (7) от величины  $\theta$ .

На рис.4 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях величины  $\theta$  и при подаче на вход системы тестового задающего сигнала в виде:

$$U_3(t) = \begin{cases} 10t & \text{при } 0 \leq t \leq 1\text{с;} \\ 10 & \text{при } 1\text{с} \leq t \leq 3\text{с;} \\ 10 - 10(t - 3) & \text{при } 3\text{с} \leq t \leq 5\text{с;} \\ -10 + 10(t - 5) & \text{при } 5\text{с} \leq t \leq 6\text{с.} \end{cases}$$

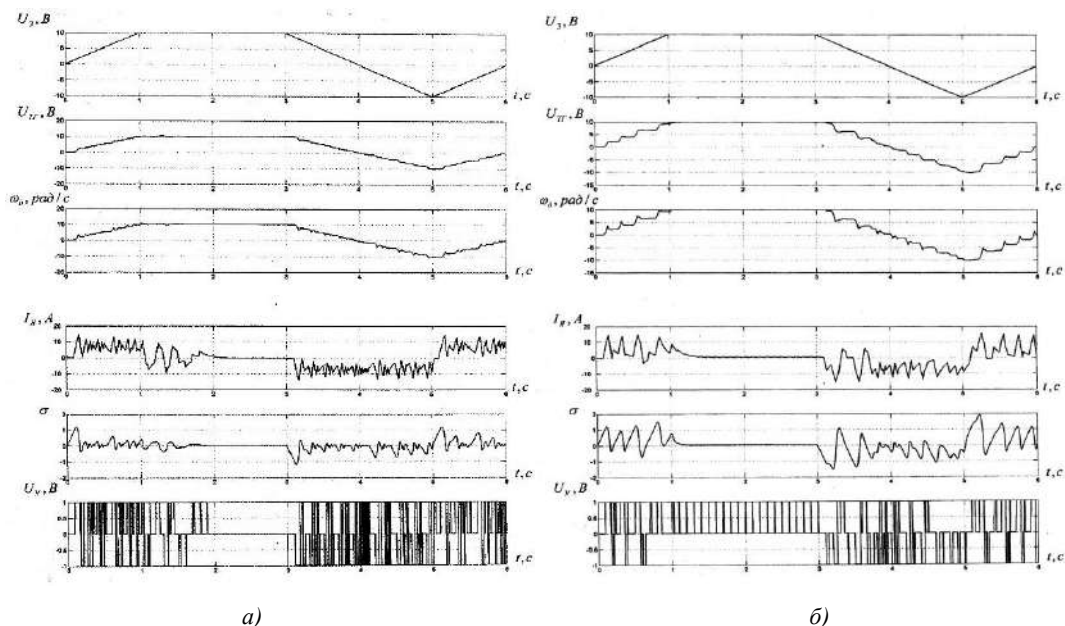


Рис. 4 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а)  $\theta = 0,05$ ;  $T_0 = 0,01\text{с}$ ; б)  $\theta = 0,3$ ;  $T_0 = 0,01\text{с}$



Сравнение процессов на рис. 4, приводит к выводу, что высокая точность наведения обеспечивается при  $\theta = 0,04 \in [0,01 \div 0,1]$ . Вне интервала  $[0,01 \div 0,1]$  точность наведения снижается.

На рис. 5 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях периода следования управляющих импульсов  $T_0$ .

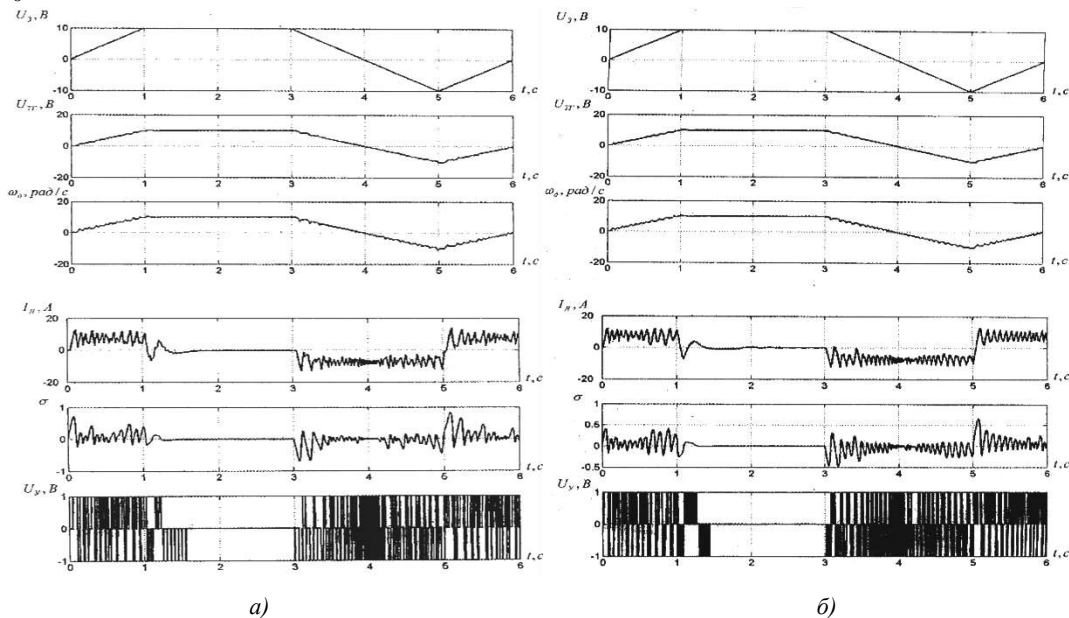


Рис. 5 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а)  $\theta = 0,03$ ;  $T_0 = 0,02$  с; б)  $\theta = 0,03$ ;  $T_0 = 0,05$  с

**Выводы.** 1. Передаточное отношение редуктора, связывающего якорь исполнительного электродвигателя с погонем командирской башенки, следует выбирать на основе компромисса между точностью наведения ТЗУ, быстродействием и энергетическими затратами на наведение. 2. Сквозность управляющих импульсов, определяемая величиной  $\theta$ , обеспечивает высокие динамические свойства замкнутой системы наведения ТЗУ при выборе величины  $\theta$  в интервале  $[0,01 \div 0,1]$ . 3. Период следования управляющих импульсов  $T_0$ , обеспечивающий высокую точность наведения и низкие энергетические затраты на наведение, не должен превышать величины  $T_0 = 0,01$  с.

**Список литературы:** 1. Александров Е. Е. Математическое моделирование динамических процессов в электроприводе импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ». – № 43. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – С. 61–63. 2. Александров Е. Е. Сравнительный анализ электронных систем импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 215–219. 3. Александров Е. Е. Параметрический синтез электромеханической

Сравнительный анализ этих рисунков позволяет сделать вывод о том, что возрастание величины  $T_0$  приводит к снижению точности системы наведения и возрастанию энергетических затрат на наведение ТЗУ. Для обеспечения же высокой точности и низких энергетических затрат на наведение, период следования управляющих импульсов не должен превышать 0,01 с.

системы наведения танкового зенитного пулемета / Е. Е. Александров, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ» – № 45. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2005. – С. 110–112. 4. Александров Е. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2004. – № 2 (1). – С. 23–26.

**Bibliography (transliterated):** 1. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektroprivoде impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 43. 2004. 61–63. Print. 2. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Sravnitelnyy analiz elektronnykh sistem impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki." *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. No. 2. 2004. 215–219. Print. 3. Aleksandrov, Ye. Ye., I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Parametricheskyy sintez electromekhanicheskoy sistemy navedeniya tankovogo zenitnogo pulemeta." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 45. 2005. 110–112. Print. 4. Aleksandrov, Ye. Ye. and T. Ye. Aleksandrova. "Vybor optimiziruемого funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza sistem stabilizatsii." *Artilleriyskoe I strelkovoe vooruzheniya*. No. 2(1). 2004. 23–26. Print.

Надійшла (received) 05.02.2015

**Александрова Татьяна Евгеньевна** – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (097) 079-50-00; e-mail: alexandrova.t@mail.ru.

**Aleksandrova Tetyana Yevgenivna** – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; tel.: (097) 079-50-00; e-mail: alexandrova.t@mail.ru.



**В. И. АЗАРЕНКОВ, И. М. МАЙКО**

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА НАЧАЛО РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

Проблема анализа температурных полей элементов конструкций радиоэлектронной аппаратуры является основной для обеспечения эксплуатационной надежности последних. В работе изложены результаты разработки методов расчёта температурных полей проектируемых и действующих изделий, основанные на аналитическом решении уравнения теплопроводности для основных форм конструкций. Предложено общее выражение решения уравнения теплопроводности для анизотропных тел с объёмным, плоским, линейным или точечным источниками тепла. Изложен метод оценки начала регулярного теплового режима в теле произвольной конфигурации с внутренними источниками энергии. Приведены расчетные зависимости решения уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода. Дана оценка результатов расчетов по полученным графическим данным путем сравнения их с результатами расчетов по аналитическим зависимостям и с экспериментальными данными о влиянии конструкции радиоэлектронной аппаратуры на начало регулярного теплового режима. Показано, что результаты исследования могут быть распространены и на решение уравнения теплопроводности анизотропного тела с внутренними источниками энергии.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловая модель, тепловое поле, температурное поле, радиоэлектронная аппаратура, тепловой режим, регулярный тепловой режим.

**Актуальность.** Экспериментальные и теоретические исследования нестационарных температурных полей радиоэлектронных аппаратов (РЭА) [1-10] допускают возможность применения теории регулярного теплового режима для разработки инженерных методов расчета нестационарного температурного режима различных конструкций РЭА. Простота используемых методов осложняется трудностью вычисления времени начала регуляризации –  $\tau_p$ . Пренебрежение численным значением этой переменной (т. е. предположение значения  $\tau_p = 0$ ) может привести к серьезным ошибкам в расчетах [3, 4, 10, 11].

**Постановка задачи.** Оценить связь времени начала регуляризации теплового режима конструкции с размещением источников теплоты, оценив  $\tau_p$  для различных практических случаев.

**Методы исследования.** Теоретически оценка времени  $\tau_p$  связана с исследованием скорости сходимости ряда, представляющего общее решение уравнения теплопроводности анизотропного тела формы параллелепипеда с объёмным внутренним источником энергии  $W$  аналогичной формы, при нулевых начальных и граничных условиях III рода, полученное в работе [12]:

$$\vartheta(x, y, z, \tau) = \sum_{a_i=1}^{\infty} \sum_{a_j=1}^{\infty} \sum_{a_k=1}^{\infty} \frac{64WT_{a_i}(\tau)}{\sum_{i=x,y,z} \left( \frac{\mu_{a_i}}{L_i} \right)^2 \lambda_i + q} \times \prod_{i=x,y,z} \frac{\sin \mu_{a_i} \frac{p_i}{L_i} \cos \mu_{a_i} \left( \frac{i}{L_i} - \frac{1}{m_i} \right) \cos \left( \frac{r_i}{L_i} - \frac{1}{m_i} \right)}{\mu_{a_i} + \sin \mu_{a_i} \cos \mu_{a_i} \left( 1 - \frac{2}{m_i} \right)}, \quad (1)$$

где  $\vartheta(x, y, z, \tau)$  – перегрев, °C ( $\vartheta = t - t_c$ );  
 $t$  – искомая температура теплового поля в интересующей точке конструкции, °C;  
 $t_c$  – температура окружающей среды, °C;  
 $W$  – удельная мощность рассеивания источника энергии, Вт/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время, с.

$T_{a_i}(\tau)$  – функция разогрева источника (при стационарном температурном режиме работы  $\tau \rightarrow \infty$  и  $T_{a_i}(\tau) = 1$ ):

$$T_{a_i}(\tau) = 1 - \exp \left\{ - \frac{\tau}{C\gamma} \left[ \sum_{j=x,y,z} \left( \frac{\mu_{a_j}}{L_j} \right)^2 \lambda_j + q \right] \right\};$$

$q$  – коэффициент температурной зависимости источников тепла;

$\mu_i$  – корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu_i = \frac{\mu_i^2 - \operatorname{Bi}_i \operatorname{Bi}_{2i}}{\mu_i (\operatorname{Bi}_i + \operatorname{Bi}_{2i})}, \quad (2)$$

$\operatorname{Bi}_i = \frac{k_i}{\lambda_i} L_i$  – критерий Био;

$\operatorname{Bi}_{1i}, \operatorname{Bi}_{2i}$  – критерии Био на противоположных гранях параллелепипеда вдоль  $i$ -й координаты;  
 $k_i$  – суммарный коэфф. теплообмена, Вт м<sup>2</sup> °C<sup>-1</sup>;  
 $\lambda_i$  – коэфф. теплопроводности, Вт м<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>;  
 $L_i$  – соответствующий координате  $i$  размер параллелепипеда, м;

$i = x, y, z$  – координаты.

Решение получено путём замены независимых переменных, классических преобразований координат и функции температуры с использованием метода разделения переменных. Если таких источников много (например,  $N$ ) и они температурнезависимы ( $q = 0$ ), то по принципу суперпозиции полей [12] можно записать

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{j=1}^N \vartheta_j(x, y, z), \quad (3)$$

где  $\vartheta_j(x, y, z)$  рассчитывается по (1).

Для температурозависимых источников тепла (на практике весьма редкий для радиоэлектроники случай, так как обычно по определению мощность эле-

ментов-источников не должна зависеть от температуры, или зависимость выражена очень слабо) можно также вычислить параметры температурного поля в нагретой зоне, применяя методы последовательных приближений и суперпозиции полей одновременно.

Решение уравнения теплопроводности (1) [12] допускает преобразование итогового результата и позволяет получить более общую запись выражения для расчета температурного поля параллелепипеда с объёмным, плоским, линейным или точечным источниками тепла. Для удобства и краткости записи в дальнейшем обозначим символом надчеркивания любую переменную, нормированную относительно значения  $L$ , например:  $\frac{\mu_i}{L_i} = \bar{\mu}_i$ . Для сокращения изло-

жения из общего решения (1) выделим только те сомножители, которые будут в результате преобразования изменяться. Раскрывая неопределенности с помощью свойства первого замечательного предела и подставляя полученный результат в (1), получим общее аналитическое выражение решения уравнения теплопроводности параллелепипеда с объёмным, плоским (один из габаритных размеров источника стремится к нулю), линейным (два из габаритных размеров источника стремятся к нулю) или точечным источниками тепла (все габаритные размеры источника стремятся к нулю):

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{a_x=1}^{\infty} \sum_{a_y=1}^{\infty} \sum_{a_z=1}^{\infty} PG_{a_{x,y,z}} T_{a_{x,y,z}}(\tau) \prod_{i=x,y,z} M_{a_i},$$

где

$$T_{a_{x,y,z}}(\tau) = 1 - \exp(-c^{-1}\gamma^{-1}G_{a_{x,y,z}}^{-1}\tau), \quad G_{a_{x,y,z}} = \frac{1}{\sum_{i=x,y,z} R_{a_i}},$$

$$M_{a_i} = \frac{d_i \mu_{a_i}^{n_1} \sin^{n_2} 0,5 \bar{\mu}_{a_i} \bar{p}_i}{p_i^{n_2} l_i^{n_4} [\mu_{a_i} + \sin \mu_{a_i} \cos \mu_{a_i} (1 - 2b_{a_i})]^{n_3}} \times$$

$$\times [\cos \mu_{a_i} (\bar{r}_i - b_{a_i}) \cos \mu_{a_i} (\bar{i} - b_{a_i})]^{n_3};$$

$d_i, n_1, n_2, n_3, n_4$ , и  $R_{a_i}$  – значения параметров приведены в табл. 1;

$b$  – определяется из преобразованного характеристического уравнения (2) [12]

$$b_i = \frac{1}{\mu_i} \operatorname{arctg} \frac{\mu_i}{Bi_{1i}};$$

$p_i$  – размер источника тепла, м.

Таким образом, мы получили математическую модель, позволяющую анализировать температурные поля различных элементов конструкций формы параллелепипеда с источниками тепла, в частности РЭА.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $d_i, n_1, n_2, n_3, n_4, R_{a_i}$

Параметры	$Bi_{1i} > 0$		$Bi_{1i} = 0$
	$p_i > 0$	$p_i = 0$	
$d_i$	4	2	1
$n_1$	0	1	0
$n_2$	1	0	0
$n_3$	1	1	0
$n_4$	0	1	1
$R_{a_i}$	$(\bar{\mu}_{a_i})^2 \lambda_i$	$(\bar{\mu}_{a_i})^2 \lambda_i$	$\bar{k}_{1i} b_{a_i}^{-1} l_i^{-1}$

Допущения, сделанные при поиске решения уравнения теплопроводности, являются стандартными, правомерность которых неоднократно описана и доказана различными исследователями. Использование вычислительной техники при расчётах, на первый взгляд, снимает вопрос сложности вычислений суммы бесконечного ряда. Справедливости ради отметим, что сходимость подобных рядов неоднократно доказана в исследовательской литературе, а использование для анализа только первого члена ряда, в случае быстрой сходимости последнего, дает в руки конструкторов инструмент для экспресс-анализа достаточной точности для принятия проекторочных решений по конструкции.

Но существует проблема иного рода: как определить скорость сходимости полученного решения? Другими словами, когда можно с допустимой погрешностью для итогов анализа температур-

ного поля воспользоваться первым членом полученной суммы бесконечного ряда, или как определить с количеством подлежащих учету членов ряда и оценкой остатка (точности)? Анализ литературы показал, что вопрос сходимости временных рядов при малых значениях времени остро обсуждается среди исследователей и пока не нашел простого разрешения.

В нашем случае можно утверждать, что использование современных ЭВМ позволяет преодолеть эти недостатки, а полученное выражение решения уравнения легко позволяет алгоритмизировать процесс вычислений. Причем, необходимое количество членов ряда может определяться программой «самостоятельно» в процессе вычислений до заданной точности.

Существует другой выход из создавшегося положения при малых значениях времени: иная форма записи аналитического решения той же краевой задачи теплопроводности, например, использование свойств тета-функции Якоби [13]:

$$\vartheta(x, \tau) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-k^2 \pi^2 \tau} \cos(2k\pi x) = \frac{1}{\sqrt{\pi \tau}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-k)^2}{4\tau}}$$

Первый ряд быстро сходится при больших значениях времени  $\tau$ , второй – при малых. Остается только свести полученное решение к виду обеих форм записи и пользоваться при расчетах в соответствии со значением параметра  $\tau$ . Даже в нашем, в общем-то, простом случае, это может оказаться нелегко и породить ещё одну проблему преобразований исходного выражения.

Нам представляется заманчивым вместо разрешения этих трудоёмких вопросов использовать третий путь к решению нашей задачи: возможность применения теории регулярного режима для определения момента времени, начиная с которого температура в любой точке тела будет определяться, по существу, первым членом ряда. Это является весьма важным для разработки инженерных методов анализа температурных полей различных конструкций. Остается при этом решить вопрос вычисления самого времени начала регуляризации ( $\tau_p$ ) теплового режима конструкции. Задача тоже не из простых.

**Решение.** Для простоты и наглядности объяснения вопроса рассмотрим сначала общее решение уравнения теплопроводности тела с внутренними источниками энергии  $W$ , при граничных условиях III рода с постоянными коэффициентами и постоянной температурой окружающей среды  $t_c$ , [3, 8–10, 14]:

$$\varepsilon = \sum_{j=0}^{\infty} N A_j^* U_j e^{-M_j F_{o_{sp}}}; \quad (4)$$

где  $A_j^*$  ( $\Phi, Bi_o, \vartheta_{ст}, \vartheta_0$ ) – безразмерные коэффициенты;

$N$  – постоянный нормирующий множитель, °C;

$U_j$  ( $\Phi, Bi_o, \frac{r}{L}$ ) – собственные функции задачи;

$M_j$  ( $\Phi, Bi_o$ ) =  $\frac{m_j}{m_{\infty}}$  – обобщенные критерии

тепловой инерции;

$\Phi$  – параметр, характеризующий форму тела;

$F_{o_{sp}} = \frac{a\tau}{K}$  – обобщенный критерий Фурье;

$\varepsilon = \vartheta_{ст} - \vartheta$  – разностная температура, °C;

$m_j$  – положительные числа ( $c^{-1}$ ), связанные условием  $0 < m_0 < m_1 < \dots$ ;

$m_{\infty} = \frac{a}{K}$  – предельное значение  $m_0$  ( $j=0$ ) при

$Bi_o = \infty, c^{-1}$ ;

$K$  – коэффициент формы тела,  $m^2$ ;

$Bi_o = \frac{kSK}{\lambda V}$  – обобщенный критерий Био;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2 c^{-1}$ ;

$S$  – площадь поверхности тела,  $m^2$ ;

$V$  – объём тела,  $m^3$ .

Существующие методы количественной оценки времени  $\tau_p$  разработаны применительно к случаю простого охлаждения ( $W = 0$ ) для тел основных форм (шар, цилиндр, параллелепипед, пластина) при равномерном начальном поле температуры [3, 4, 9, 14, 15]. Поэтому представляет практический интерес разработка методов количественной оценки  $\tau_p$  для тел с внутренними источниками энергии и с деформированной (по отношению к основным формам) поверхностью при различных законах распределения источников.

На стадии регулярного режима, опуская индекс «0», получим из (4)

$$\varepsilon = N A^* U e^{-M F_{o_{sp}}}. \quad (5)$$

Воспользовавшись определением относительной ошибки  $\delta\varepsilon$  как отношения предельной максимальной абсолютной ошибки  $\Delta\varepsilon_{\max}$  расчета по (5) к максимальной температуре  $\varepsilon_{\max}$  в момент начала регулярного теплового режима ( $\tau_p=0$ ), получим

$$\delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \leq \frac{\max_{i,j} |A_j^* U_{ij}|}{\max_i (A_j^* U_i)} e^{-\left(1 - \frac{M}{M_i}\right) M_i F_{o_{sp} \tau_p}} \times \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\max_i |A_j^* U_{ij}|}{\max_{i,j} |A_j^* U_{ij}|} e^{-\left(\frac{M_j}{M_i} - 1\right) M_i F_{o_{sp} \tau_p}} \leq \delta\varepsilon_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $F_{o_{sp} \tau_p}$  – значение обобщенного критерия Фурье при  $\tau = \tau_p$ ;

$i\left(\frac{r}{L}\right)$  – местоположение точки в теле.

Из определения  $\Delta\varepsilon_{\max}$  следует, что неравенство (6) позволяет оценить предельное время  $\tau_p$ , характеризующее начало регулярного режима во всех точках тела, с абсолютной ошибкой, не превышающей  $\Delta\varepsilon_{\max}$ .

С целью упрощения расчетных зависимостей введем некоторые ограничения.

1. Согласно теории приближенного подобия [3, 11], разобьём исследуемые тела произвольной конфигурации на три группы. Тела каждой группы равновелики по объёму с простейшим телом (шаром, цилиндром, пластиной). Коэффициент формы в критериях  $Bi_o$  и  $F_{o_{sp}}$  будет характеризовать приближенное подобие температурных полей исследуемого и простейших тел [16], а неравенство (6) распадается при этом на три неравенства, соответствующие одномерным температурным полям шара, цилиндра и пластины при значениях  $Bi_o$  и  $F_{o_{sp}}$  исследуемого тела.

Для озвученных выше простейших тел имеют место следующие соотношения [11, 14]:

$$|U_{ij}| \leq 1; \quad M_j = \frac{\mu_j^2}{\mu_{\infty}^2}; \quad \mu_{j+1} \approx \pi; \quad \mu_j = \pi\mu_1 + (j-1)\pi. \quad (7)$$

2. Начальное температурное поле равномерно, и  $\vartheta_0 \equiv 0$ . Источники энергии имеют постоянную мощность и распределены равномерно при  $b \gg 1$  [16, 17], сконцентрированы в центре при  $b \ll 1$  [16] или сосредоточены на периферии тела при  $b \ll 1$  [17]:

$$W = W_0 e^{-\frac{r}{Lb}}; \quad (8)$$

$$W = W_0 e^{-\left(1 - \frac{|r|}{L}\right)^b}. \quad (9)$$

Решение уравнения стационарной теплопроводности при условии (8), (9) и граничных условиях III рода позволяет получить выражение для  $\vartheta_{ст}$  простейших тел при различных законах распределения источников энергии. После подстановки  $\vartheta_{ст}$  в интегралы для вычисления  $A_j^*$  [1, 9] получим, с учетом (7), следующее выражение для отношений коэффициентов в (6):

$$\frac{|A_j^*|}{A^*} = \frac{|A_j|}{A} \left( \frac{M}{M_j} \right)^n, \quad (10)$$

где  $n$  – коэффициент, учитывающий характер распределения источников:  
 $n = 1,0$  – равномерное распределение источников;

$n = 0,5$  – центральное распределение источников при  $Bi_0 \gg 1$ ;

$n = 0,0$  – периферийное и центральное распределение источников при  $Bi_0 < 1$ ;

$A_j$  – постоянные коэффициенты [11] при  $W \equiv 0$  (простое охлаждение).

Для всех простейших тел в выражении (6)

$$\max_{j \geq 1} |A_j| = |A_1|. \quad (11)$$

Учитывая указанные ограничения, рассмотрим два наиболее интересных с практической точки зрения случая.

**Случай 1.**  $F_{о,сп} \approx 0$ .

Тогда из (6) при условии (7), (10), (11) имеем

$$\delta \epsilon_{к} = \xi \frac{|A_1|}{A} \left( \frac{M}{M_1} \right)^n \leq \delta \epsilon_{доп}, \quad (12)$$

где «к» – шар, цилиндр, пластина;

$$\xi = \sum_{j=2}^{\infty} 1 + \frac{|A_j|}{|A_1|} \left( \frac{M_j}{M_1} \right)^n.$$

Значения суммы  $\xi$ , полученные согласно выражений для  $|A_j|$  (табл. 2, рис. 1) и соотношений (7), приведены в табл. 3.

Таблица 2 – Расчетные зависимости для  $|A_j|$  (здесь  $J_0, J_1$  – функции Бесселя)

Форма тела	Пластина		Цилиндр		Шар		Примечание
	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$	
$ A_j $	$\frac{2Bi}{\mu_j^2}$	$\frac{2}{\mu_j}$	$\frac{2Bi}{\mu_j^2 J_0(\mu_j)}$	$\frac{2}{\mu_j J_1(\mu_j)}$	$\frac{2Bi}{\mu_j}$	2	$j \geq 1$

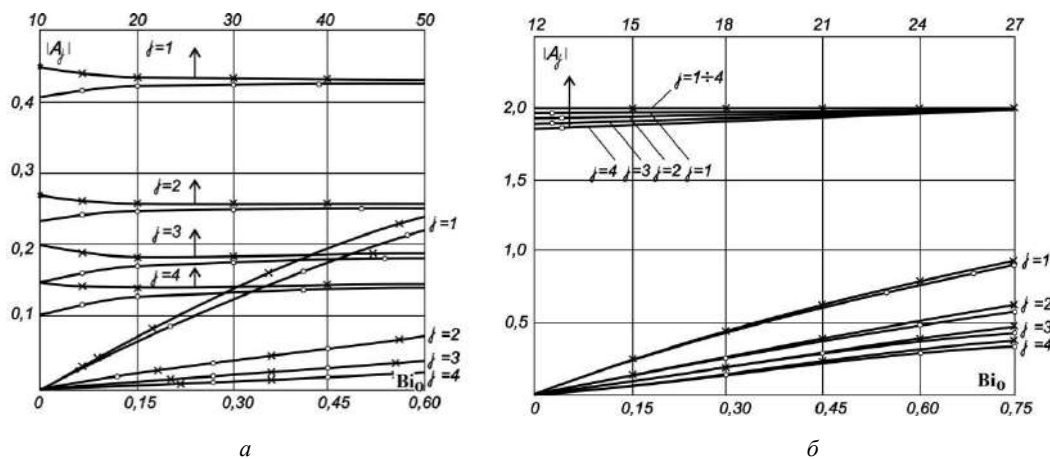


Рис. 1 – Зависимость  $|A_j|=f(Bi_0)$ :

$a$  – для пластины;  $b$  – для шара.

○ – расчет по аналитическим зависимостям [11]; × – расчет по приближенным формулам табл. 1

**Случай 2.**  $F_{о,сп} \geq 0,5$ . Анализ значений  $M_j$  [11] и их отношений во всем диапазоне критерия Био показывает, что сумма ряда в (6) при условии (7), (10), (11) значительно меньше единицы и ею можно пренебречь. Тогда из (6) имеем

$$\delta \epsilon_{к} = \frac{|A_1|}{A} \left( \frac{M}{M_1} \right)^n e^{-\left(1 - \frac{M}{M_1}\right) M_1 F_{о,сп}} \leq \delta \epsilon_{доп}. \quad (13)$$

Нетрудно показать, что зависимости (12) и (13) справедливы для случая температурозависимых равномерно распределённых источников, если ввести постоянную поправку к  $M_j$  [5].

На рис. 2 приведены результаты расчета по формулам (12) и (13) при различных законах распределения источников ( $n = 1; 0$ ) и сравнительные данные для выбранных тел простейших форм.

На рис. 3 дана оценка времени  $\tau_p$  по (13) для нагретых зон РЭА с неравномерным распределением источников энергии ( $n = 0$ ). Здесь же для сравнения приведены экспериментальные данные и расчеты по методу элементарных балансов [17].

Таблица 3 – Значения параметров (13)  $|A_1|/A$ ,  $M$ ,  $M_1$ ,  $M/M_1$  для шара (как пример)

Форма тела	Шар			
	$ A_1 /A$	$M$	$M_1$	$M/M_1$
0	0,000	0,000	2,050	0,000
0,010	0,015	0,010	2,060	0,050
0,05	0,073	0,051	2,088	0,024
0,10	0,131	0,093	2,117	0,044
0,20	0,213	0,161	2,181	0,072
0,30	0,296	0,229	2,245	0,100
0,40	0,376	0,297	2,309	0,128
0,50	0,461	0,366	2,372	0,155
1,00	0,659	0,554	2,657	0,206
2,00	0,815	0,735	3,062	0,240
3,00	0,902	0,810	3,276	0,247
4,00	0,941	0,855	3,460	0,247
5,00	0,955	0,883	3,534	0,250
10,00	0,985	0,941	3,745	0,251
20,00	0,998	0,970	3,881	0,251
$\infty$	1,000	1,000	4,000	0,250

**Выводы.** Анализ выражений (12), (13) и рис. 2, 3 показывают следующее.

1. Внутренние источники энергии способствуют ускорению начала регулярного режима. Количественно это выражается тем, что относительная ошибка

расчета по выражению (5) уменьшается в  $\left(\frac{M_1}{M_j}\right)^n$  раз

при тех же значениях критерия  $F_{\text{окр}}$ . Так, для пластины при  $F_{\text{окр}} \approx 0$  и  $Bi_0 = 0,4$  ошибка уменьшается в 20 раз (рис. 2, в, з), а при  $Bi_0 > 10$  – в 10 раз. Для шара при простом нагревании ( $n = 0$ ) ошибка теоретически равна  $\infty$  (табл. 2), а при  $n = 1$  и  $Bi_0 = 0,4$  она составляет 6% (рис. 2, б).

2. На процесс регуляризации существенное влияние оказывает характер распределения источников в теле. В (12) и (13) это влияние выражается изменением показателя  $n$ . Наиболее ускоряется регуляризация при равномерном распределении ( $n = 1$ ). При крайне неравномерном распределении источников ( $n = 0$ ) регуляризация практически наступает так же, как при простом нагревании, т. е. значительно медленнее. Поэтому применение теории регулярного режима для исследования нестационарных тепловых режимов РЭА наиболее эффективно при равномерном

распределении источников. Исходя из этого, можно сделать следующее предложение для разработчиков конструкций, в частности РЭА: для ускорения регуляризации теплового режима изделия необходимо при проектировании обеспечить максимально возможное равномерное распределение источников тепла по объему. Хорошим решением для «выравнивания» распределения энергии внутри объема является размещение наиболее мощных источников теплоты на монтажных шинах конструкции с высокими и очень высокими показателями теплопроводности, например, тепловых трубах. При этом размер шин может простираться на всё монтажное пространство конструкции как вдоль одной координаты, так и вдоль нескольких.

3. Расчеты по (12) дают завышенные значения ошибок, что вытекает из структуры ряда для  $\xi$ , где не учитываются знаки при  $A_j$ . При малых уровнях ошибок это завышение для практической оценки времени  $\tau_p=0$  несущественно (рис. 2, б, з). При больших уровнях ошибок (рис. 2, а, в) возникает необходимость перехода к расчету  $\tau_p$  по (13). Расчеты по (13) для случая простого нагревания практически совпадают с существующими методами оценки для тел простейшей формы (рис. 2, д), а также удовлетворительно согласуются с экспериментальными и расчетными данными для нагретых зон РЭА с неравномерным (рис. 3) и равномерным распределением источников [3].

4. Количественная оценка  $\tau_p$  по (12) и (13) для тел произвольной конфигурации основывается на теории приближенного подобия, поэтому строго выполняется для центральной зоны тела и может быть распространена на периферию по мере приближения формы исследуемого тела к простейшему.

5. Задача оценки начала регулярного теплового режима в теле с внутренними источниками теплоты решена. Получены рекомендации по проектированию и анализу температурных полей конструкций с источниками тепла. Проведена аналитическая сравнительная оценка полученных результатов исследований. Для визуализации исследуемых процессов и результатов анализа построены графики, облегчающие понимание рассмотренных явлений и результатов исследований.

В работах Г. М. Кондратьева и Г. Н. Дульнева изложенная до них теория регулярного теплового режима при простом нагреве или охлаждении тел и систем получила дальнейшее развитие и обобщена на случай нагрева или охлаждения тел или систем с внутренними источниками или стоками энергии [2]. При этом предполагалось, что мощность источников или стоков неизменна во времени, температура среды постоянна, а теплофизические свойства тела изотропны и с коэффициентом теплопередачи не зависят от температуры.

Покажем, что приведенные нами ранее в этой работе результаты изучения вопросов регуляризации теплового поля конструкции справедливо не только для решения уравнения теплопроводности изотропного тела с внутренними источниками энергии для тел простейшей формы (параллелепипед, цилиндр, шар)

Таблица 4 – Значения суммы  $\xi$  (значение  $\infty$  означает, что ряд  $\xi$  в (12) расходится)

Закон распределения источников	Пластина		Цилиндр		Шар	
	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$	$Bi_0 < 1$	$Bi_0 > 10$
Равномерный	1,08	1,40	1,20	1,80	1,40	2,36
Центральный	1,64	2,11	3,12	4,24	$\infty$	$\infty$
Периферийный	1,64	$\infty$	3,12	$\infty$	$\infty$	$\infty$

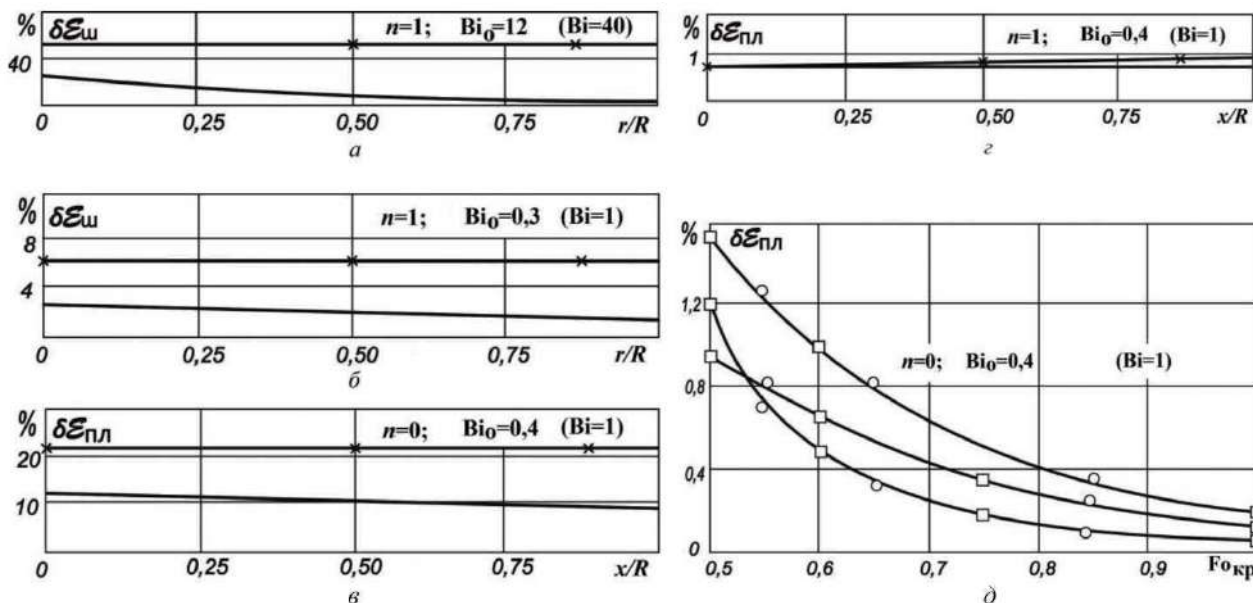


Рис. 2 – Значения ошибок  $\delta\epsilon_k = f(F_{0кр}, Bi_0)$ :

— — расчет по аналитическим зависимостям [11]; × — расчет по (12); а, б — для шара; в, з, д — для пластины.  
□ — расчет по (10); ○ — расчет по методу Олейника [3]

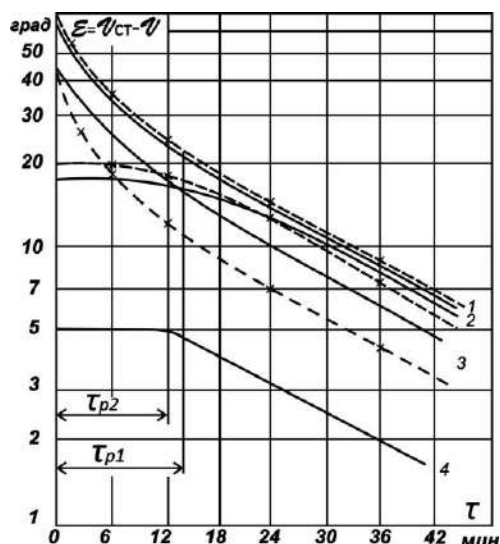


Рис. 3 – Характер регуляризации температурного поля в РЭА с неравномерным распределением источников энергии ( $n = 0$ ): 1, 2 – цилиндрический блок; 3, 4 – блок в форме параллелепипеда; — — расчет по методу тепловых балансов [17];  $\tau_1, \tau_2$  – расчет по (13); × – опыт

при граничных условиях III рода с постоянными коэффициентами и постоянной температурой окружающей среды (4), а может быть распространено и на наше решение уравнения теплопроводности (1) анизотропного твердого тела формы параллелепипеда (а так же цилиндра и шара [12]) с источниками или стоками энергии аналогичной формы при нулевых начальных и граничных условиях III рода. Это становится возможным в результате перехода к новым координатам [3] в исходном уравнении теплопроводности

$$x^* = x \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_x}}; y^* = y \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_y}}; z^* = z \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_z}}. \quad (14)$$

Таким образом, определение начала регулярного режима тел с анизотропными теплофизическими свойствами (каковыми являются конструкции радио-электронной аппаратуры) может производиться по зависимостям, что и для изотропных тел. Различие заключается только в выражении для вычисления коэффициента формы, которое с учетом (14) будет иметь следующий вид, например для параллелепипеда:

$$K^* = \left\{ \pi^2 \left[ \left( L_x \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_x}} \right)^{-2} + \left( L_y \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_y}} \right)^{-2} + \left( L_x \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_x}} \right)^{-2} \right] \left[ \left( L_x \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_x}} \right)^{-2} \right]^{-1} \right\}.$$

**Список литературы:** 1. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с. 2. Дульнев Г. Н. Обобщенная теория регулярного режима / Г. Н. Дульнев, Г. М. Кондратьев // Известия АН СССР, ОТН, 1956. – № 7. – С. 27–33. 3. Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семьякин. – Л.: «Энергия», 1968. – 361 с. 4. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н. А. Ярышев. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 256 с. 5. Вессельман С. Г. Регулярный тепловой режим в радиоэлектронных аппаратах с переменной мощностью / С. Г. Вессельман, И. М. Майко, А. Л. Оксман // Изв. высш. учебн. заведений. Радиоэлектроника. – 1969. – № 12. – С. 35–41. 6. Григорьев Б. А. Теплообмен: учеб. пособие / Б. А. Григорьев, Ф. Ф. Цветков. – М.: МЭИ, 2005. – 550 с. 7. Брюханов О. Н. Теплообмен: учеб. пособие / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – М.: АСВ, 2005. – 461 с. 8. Дульнев Г. Н. Основы теории теплообмена: учеб. пособие / Г. Н. Дульнев, С. В. Тихонов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 93 с. 9. Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена: учеб. пособие / Г. Н. Дульнев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с. 10. Начало регулярного теплового режима в теле с внутренними источниками энергии / И. М. Майко, И. М. Брынецев, А. М. Синотин, В. А. Шатилов // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО. – 1972. – Вып. 1. – С. 26–33. 11. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 392 с. 12. Азаренков В. И. Аналитическое решение уравнения теплопроводности в задачах анализа и синтеза температурных полей радиоэлектронной аппаратуры: Дис... канд. техн. наук: 01.05.02 / В. И. Азаренков. – Харьков, 2015. – 190 с. 13. Ланс Д. Н. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин / Д. Н. Ланс. – М.: Иностранная литература, 1962. – 216 с. 14. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с. 15. Черпаков П. В. Теория регулярного теплообмена / П. В. Черпаков. – М.: Энергия, 1975. – 224 с. 16. Майко И. М. Приближенный метод определения коэф-

фициента формы тел / И. М. Майко // Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение. – 1970. – № 11. – С. 41–47. 17. Чернышенко А. А. Расчет нестационарного теплового режима радиоэлектронных аппаратов по методу тепловых балансов / А. А. Чернышенко, И. М. Майко, А. Л. Оксман // Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение. – 1970. – № 7. – С. 35–39.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kondrat'ev, G. M. *Reguljarnyj teplovoj rezhim*. Moscow: Gostehizdat, 1954. Print. 2. Dul'nev, G. N. and G. M. Kondrat'ev. "Obobshhennaja teorija reguljarnogo rezhima." *Izvestija AN SSSR, OTN*. No. 7. 1956. 27–33. Print. 3. Dul'nev, G. N. and Je. M. Semjashkin. *Teploobmen v radiojelektroonnyh apparatah*. Leningrad: "Jenergija". 1968. Print. 4. Jaryshev, N. A. *Teoreticheskie osnovy izmerenija nestacionarnyh temperature*. Leningrad: Jenergoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. Print. 5. Vessel'man, S G., I. M. Majko and A. L. Oksman. "Reguljarnyj teplovoj rezhim v radiojelektroonnyh apparatah s peremennoj moshhnost'ju." *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij. Radioelektronika*. No. 12. 1969. 35–41. Print. 6. Grigor'ev, B. A. *Teplo-massoobmen : ucheb. posobie*. Moscow: MJeI. 2005. Print. 7. Brjuhanov, O. N., and S. N. Shevchenko *Teplo-massoobmen : ucheb. posobie*. Moscow: ASV. 2005. Print. 8. Dul'nev, G. N., and S. V. Tihonov. *Osnovy torii teploobmena : ucheb. posobie*. St. Petersburg: SPbGU ITMO. 2010. Print. 9. Dul'nev, G. N. *Teorija teplo- i massooobmena : ucheb. posobie*. St. Petersburg: NIU ITMO. 2012. Print. 10. Majko, I. M., I. M. Bryncev, A. M. Sinotin and V. A. Shatilov. "Nachalo reguljarnogo teploвого rezhima v tele s vnutrennimi istochnikami jenerгии". *Voprosy radioelektroniki. Serija TRTO*. Vyp. 1. 1972. 26–33. Print. 11. Lykov, A. V. *Teorija teploprovodnosti*. M Moscow: Vysshaja shkola. 1967. Print. 12. Azarenkov, V. I. *Analiticheskoe reshenie uravnenija teploprovodnosti v zadachah analiza i sinteza temperaturnyh polej radiojelektroonnoj apparatury. Dis... kand. tehn. Nauk*. Kharkov, 2015. Print. 13. Lans, D. N. *Chislennye metody dlja bystrodejstvujushhh vychislitel'nyh mashin*. Moscow: Inostrannaja literatura, 1962. Print. 14. Lykov, A. V. *Teploobmen. Spravochnik*. Moscow: Jenergija, 1978. Print. 15. Cherpakov, P. V. *Teorija reguljarnogo teploobmena*. Moscow: Jenergija, 1975. Print. 16. Majko, I. M. "Priblizhennyj metod opredelenija koeficienta formy tel." *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij. Priborostroenie*. No. 11. 1970. 41–47. Print. 17. Chernyshenko, A. A., I. M. Majko and A. L. Oksman. "Raschet nestacionarnogo teploвого rezhima radiojelektroonnyh apparatov po metodu teplovyh balansov." *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij. Priborostroenie*. No. 7. 1970. 35–39. Print.

Поступила (received) 15.11.2015

**Азаренков Владимир Ильич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры системного анализа и управления; тел.: (050) 524–84–84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

**Azarenkov Vladimir Ilyich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Department of system analysis and management; tel.: (050) 524–84–84; e-mail:azarnikov@ukr.net.

**Майко Игорь Макарович** – кандидат технических наук, доцент, пенсионер; тел.: (050) 524–84–84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

**Maiko Igor Makarovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, pensioner; tel.: (050) 524–84–84; e-mail: azarnikov@ukr.net.

А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, А. Ю. СИДОРЕНКО

### АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ПОРЯДКА СТАЦИОНАРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО МАРКОВСКОГО ПОЛЯ НА ПЛОСКОСТИ

Предлагается алгоритм построения двухмерного вещественного нормального марковского поля второго порядка, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна-Уленбека. Показано, что предлагаемый подход позволяет синтезировать марковские случайные поля более высокого порядка. Смоделированы нормальные марковские поля нулевого, первого и второго порядков, реализованные на плоской поверхности двух переменных.

**Ключевые слова** случайный процесс, марковские поля, двумерный объект, процесс Орнштейна-Уленбека, генерирование случайных полей.

**Введение.** При стохастическом моделировании для вычислительной задачи необходим синтез алгоритмов генерации случайных величин с необходимыми свойствами. Зачастую задачи сводятся к генерированию не одномерных случайных величин, а двухмерных случайных полей, а также полей еще более высокой размерности. Так, алгоритмы генерирования случайного двумерного объекта на плоскости используются при моделировании движения транспортных средств, а также при рассмотрении других задач, решение которых требует применить марковские нормальные случайные поля второго порядка.

Алгоритмы генерирования двумерных марковских полей [1, 2] приспособлены для построения полей лишь нулевого или первого порядка. Между тем, в задачах машиностроения [3], технической электродинамики [4], навигации [6] и других случайные поля должны характеризоваться, по крайней мере, вторым порядком. Это обусловлено, прежде всего, необходимостью их применения при моделировании динамических задач, в которых рассматриваются дифференциальные уравнения второго или более высокого порядков.

В данной работе синтезирована последовательность вложенных алгоритмов генерирования случайного объекта – нормального марковского поля второго порядка, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна-Уленбека (ОУ-процесс), в которых дифференциальные уравнения имеют второй или выше порядок.

**Целью** данной работы является построение алгоритма повышения порядка нормального марковского поля, любые ортогональные одномерные сечения которого являются стационарными случайными ОУ-процессами.

#### Математическая модель исследования.

В теории стохастических марковских процессов и полей известно уравнение Ланжевена первого порядка [6, 7]. Решением этого уравнения является дифференцированная функция. Это означает, что функция имеет порядок на единицу выше, чем порождающий процесс «белого» шума.

В этом случае уравнение движения для марковского поля  $h(x, y)$  имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \nu\right) \left(\frac{\partial}{\partial y} + \mu\right) h(x, y) = u(x, y), \quad (1)$$

где  $u(x, y)$  – случайное поле, имеющее свойства гауссовского двумерного «белого» шума на плоскости  $xOy$  с единичной интенсивностью;  $\nu$  и  $\mu$  – декременты стохастического движения вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

К уравнению (1) необходимо присоединить граничные условия, которые соответствуют двум нормальным марковским процессам и описываются парциальными уравнениями Ланжевена

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \nu\right) h(x, 0) = u(x, 0), \quad \left(\frac{\partial}{\partial y} + \mu\right) h(0, y) = u(0, y), \quad (2)$$

реализующимися вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно, а также начальное условие, отвечающее вершинному значению случайной величины

$$h(0, 0) = u(0, 0). \quad (3)$$

Основным свойством нормального марковского поля  $H(x, y)$  (НМД-поля) является его корреляционный функционал с парциальными корреляторами  $p = \exp(-\nu |x - x'|)$ ,  $q = \exp(-\mu |y - y'|)$ :

$$K_{xy} = K_{xy}(x, y | x', y') = M[H(x, y)H(x', y')] = pq\sigma^2, \quad (4)$$

где случайная величина  $h(x, y)$  – реализация гауссовского двумерного поля  $H(x, y)$  в прямоугольной области  $\{x \in [0, a], y \in [0, b]\}$  на плоскости  $xOy$ ;

$\nu$  и  $\mu$  – декременты затухания поля  $h(x, y)$  вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Обобщением известных конструкций (переходных вероятностей для нормального марковского ОУ-процесса) может быть переходная плотность распределения вероятностей для амплитуды поля  $H(x, y)$

$$f_H(h(x, y) | h(x', y), h(x, y'), h(x', y')) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-p^2)(1-q^2)}\sigma^2} \exp\{-Q[h(x, y)]\}, \quad (5)$$



где  $Q[h(x, y)]$  – квадратичная форма относительно переменных поля

$$Q[h(x, y)] = \frac{[h(x, y) - ph(x', y) - qh(x, y') + pqh(x', y')]^2}{2(1 - p^2)(1 - q^2)\sigma^2}.$$

В случае если  $x' \rightarrow \infty$  или  $y' \rightarrow \infty$  получаем граничные переходные плотности вероятностей  $f_H(h(x, y) | h(x', y))$  или  $f_H(h(x, y) | h(x, y'))$ , которые рассматриваются в качестве переходных плотностей для парциальных ОУ-процессов, а при  $x' \rightarrow \infty$  и  $y' \rightarrow \infty$  вершинную плотность распределения вероятностей равновесного вида  $f_H(h(x, y))$  для случайной величины – реализации  $h = H(x, y)$  поля  $H_1(x, y)$  в точке с координатами  $(x, y)$ , откуда получается корреляционная функция (4).

Таким образом, если использовать обозначения  $u(x, y) \rightarrow H^{(0)}(x, y)$  и  $h(x, y) \rightarrow H^{(1)}(x, y)$ , то действие дифференциального выражения (1), граничных начальных условий (2) и вершинного начального условия (3) можно формально записать как операторное соотношение с дифференциальным оператором  $D(v, \mu)$  вида

$$D(v, \mu)H^{(1)}(x, y) = H^{(0)}(x, y) \quad (6)$$

или операторное соотношение с интегральным оператором  $I(v, \mu)$

$$H^{(1)}(x, y) = I(v, \mu)H^{(0)}(x, y). \quad (7)$$

Явный вид этого операторного соотношения можно записать с помощью выражения

$$\begin{aligned} H^{(1)}(x, y) = & \frac{1}{\sqrt{4v\mu}} \left\{ (v\mu)^{-1} \exp(-vx - \mu y) H^{(0)}(0, 0) + \right. \\ & + \mu^{-1} \int_0^x \exp[-v(x-x')] H^{(0)}(x', 0) dx' + \\ & + v^{-1} \int_0^y \exp[-\mu(y-y')] H^{(0)}(0, y') dy' + \\ & \left. + \int_0^x \int_0^y \exp[-v(x-x') - \mu(y-y')] H^{(0)}(x', y') dx' dy' \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, если поле  $H^{(0)}(x, y)$  является заданным вместе с граничными условиями, то при заданной очередной паре парциальных декрементов затухания  $v$  и  $\mu$  поля вдоль осей  $x$  и  $y$  можно определить поле  $H^{(1)}(x, y)$ . Можно убедиться, что марковское свойство для поля  $H^{(1)}(x, y)$  согласно (8) имеет место вдоль граничных осей  $x$  и  $y$ , а также на плоскости  $xOy$ .

**Алгоритм генерирования НМД-поля  $k$ -го порядка  $H^{(k)}(x, y)$ .** Пусть теперь ищется НМД-поле  $k$ -го порядка  $H^{(k)}(x, y)$ , а НМД-поле  $(k-1)$ -го

порядка  $H^{(k-1)}(x, y)$  является заданным вместе с начальным условием и граничными условиями с декрементами  $v_k$  и  $\mu_k$  соответственно, то есть оба поля  $H^{(k-1)}(x, y)$  и  $H^{(k)}(x, y)$  связаны соотношением вида  $D(v_k, \mu_k)H^{(k)}(x, y) = H^{(k-1)}(x, y)$ .

Тогда для искомого поля  $H^{(k)}(x, y)$  получаем согласно (6) и (7)

$$H^{(k)}(x, y) = I(v_k, \mu_k)H^{(k-1)}(x, y). \quad (9)$$

На основании решения (8) можно построить численный алгоритм генерирования НМД-поля  $H^{(k)}(x, y)$  при условии, что ранее получены значения  $H^{(k-1)}(x, y)$ . Этот рекуррентный алгоритм обеспечивает генерирование значений в узлах случайного нормального стационарного марковского поля в прямоугольной области со сторонами  $a$  и  $b$ .

Рассмотрим на плоскости  $xOy$  прямоугольник с одной из вершин расположенных в точке  $(0; 0)$ . Выберем сетку узлов  $\{0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M\}$  с шагом  $\Delta_x$  вдоль оси  $x$  и с шагом  $\Delta_y$  вдоль оси  $y$  так, чтобы  $N = a/\Delta_x$  и  $M = b/\Delta_y$ .

Тогда искомым рекуррентный алгоритм значений  $\{h_{n,m}^{(k)}, 0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M\}$  НМД-поля  $H^{(k)}(x, y)$ , с помощью приведенной в [2, 5] техники, удобно представить следующими 5 шагами.

**Рекуррентный алгоритм значений НМД-поля  $k$ -го порядка:**

**Шаг 1.** Генерирование значения в вершине  $n = 0, m = 0$ :

$$g_{0,0} = h_{0,0}^{(k-1)}. \quad (10)$$

**Шаг 2.** Генерирование значений ОУ-процесса вдоль  $x$ -границы  $n > 0, m = 0$ :

$$g_{n+1,0} = p_k g_{n,0} + \sqrt{1 - p_k^2} h_{n+1,0}^{(k-1)}. \quad (11)$$

**Шаг 3.** Генерирование значений ОУ-процесса вдоль  $y$ -границы  $n = 0, m > 0$ :

$$g_{0,m+1} = q_k g_{0,m} + \sqrt{1 - q_k^2} h_{0,m+1}^{(k-1)}. \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} g_{n+1,m+1} = & p_k g_{n,m+1} + q_k g_{n+1,m} - p_k q_k g_{n,m} + \\ & + \sqrt{(1 - p_k^2)(1 - q_k^2)} h_{n+1,m+1}^{(k-1)}. \end{aligned} \quad (13)$$

**Шаг 5.** Получение искомым значений  $\{h_{n,m}^{(k)}, 0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M\}$ :

$$h_{n,m}^{(k)} = \frac{1}{\sqrt{4v_k \mu_k}} g_{n,m}. \quad (14)$$

В выражениях (10)–(14) обозначено  $p_k = \exp(-v_k \Delta_x)$ ,  $q_k = \exp(-\mu_k \Delta_y)$  с парциальными декрементами  $v_k$  и  $\mu_k$ ,  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  – расстояния между узлами вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Отметим, что при выбранных значениях  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  (то есть при количестве шагов  $N$  и  $M$ , которые отвечают заданным размерам прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$ ) интенсивность в числовом алгоритме необходимо пронормировать таким образом, чтобы энергия НМД-поля  $H^{(k)}(x, y)$ , приходящаяся на единицу плоскости, совпадала с заданной при любом количестве шагов.

Из формул (10)–(14) можно получить величины математического ожидания для значений  $h_{n,m}^{(k)}$  и  $(h_{n,m}^{(k)})^2$  для любых  $(n, m)$ -узлов поля  $H^{(k)}(x, y)$ , а именно

$$M[H_{n,m}^{(k)}] = 0, \quad M[(H_{n,m}^{(k)})^2] = \text{const}, \quad (15)$$

если последовательно уменьшать значение  $n$ -индекса, а потом значение  $m$ -индекса, и, наконец, найти безусловное равновесное среднее при  $n = m = 0$ .

Таким образом, алгоритм (10)–(14) генерирования значений случайного поля  $H^{(k)}(x, y)$  в прямоугольнике на плоскости является стационарным.

Объединение (8)–(15) дает возможность сформулировать следующее.

**Утверждение 1.** Пусть на выбранной декартовой сетке с шагами  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  между узлами вдоль осей  $x$  и  $y$  задано для  $k=0$  поле  $H^{(0)}$  «белого» шума с интенсивностью  $\sigma_0$ , а для  $k=1, 2, \dots$  известна последовательность декрементов  $\{(v_1, \mu_1), (v_2, \mu_2), \dots, (v_k, \mu_k)\}$ . Тогда для переходных вероятностей  $\{f_{H^{(k)}}(\cdot)\}$  амплитуд  $\{h_{n,m}^{(k)}\}$  нормального марковского поля  $H^{(k)}(x, y)$  порядка  $k$  могут быть использованы следующие переходные вероятности для амплитуд НМД-поля

$$f_{H^{(k)}}(h_{n,m}^{(k)} | h_{n-1,m}^{(k)}, h_{n,m-1}^{(k)}, h_{n-1,m-1}^{(k)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-p_k^2)(1-q_k^2)\sigma_k^2}} \times \exp\left\{-\frac{[h_{n,m}^{(k)} - p_k h_{n-1,m}^{(k)} - q_k h_{n,m-1}^{(k)} + p_k q_k h_{n-1,m-1}^{(k)}]^2}{2(1-p_k^2)(1-q_k^2)\sigma_k^2}\right\}, \quad (16)$$

где  $p_k = \exp(-v_k \Delta_x)$ ,  $q_k = \exp(-\mu_k \Delta_y)$  – корреляторы с парциальными декрементами  $v_k$  и  $\mu_k$  соответственно;

$$\sigma_k^2 = M[(H_{n,m}^{(k)})^2] = \frac{\sigma_{k-1}^2}{4v_k \mu_k}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Набор  $\{f_{H^{(k)}}(\cdot)\}$  этих плотностей вместе с набором  $H^{(k)}(x, y)$  полей образуют последователь-

ность, которая является самосогласованной в совокупности.

**Утверждение 2.** Пусть выражение (9) описывает интегральный оператор  $I(v, \mu)$  повышения порядка НМД-поля на единицу, отвечающее заданной паре  $v$  и  $\mu$ . Тогда для заданного  $K$  и заданных декрементных наборов  $\{v_1, v_2, \dots, v_K\}$  и  $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K\}$  с помощью интегрального оператора

$$H^{(K)}(x, y) = I(v_K, \mu_K) \dots I(v_1, \mu_1) H^{(0)}(x, y) \quad (17)$$

может быть получено НМД-поле порядка  $K$ .

**Утверждение 3.** Обозначим с помощью  $\hat{I}(v, \mu)$  оператор, который на основании (10)–(14) соответствует алгоритму повышения порядка случайной реализации НМД-поля,  $h_{n,m}^{(k)} = \hat{I}(v_k, \mu_k) h_{n,m}^{(k-1)}$ ,  $0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M$ .

Тогда

$$h_{n,m}^{(K)} = \hat{I}(v_K, \mu_K) \dots \hat{I}(v_k, \mu_k) \dots \hat{I}(v_1, \mu_1) h_{n,m}^{(0)}, \quad (18)$$

$$0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M.$$

**Замечание.** Решение (8) и его обобщение (17) по существу являются явным видом решения уравнения Ланжевена на плоскости для первого и соответственно для  $K$ -го порядка.

**Результаты генерирования НМД.** На рис. 1–3 представлены пример генерирования поля  $H^{(0)}(x, y)$  «белого» шума и, связанные с ним, примеры генерирования поля  $H^{(1)}(x, y)$  первого порядка и поля  $H^{(2)}(x, y)$  второго порядка на выбранной декартовой сетке с шагами  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  между узлами вдоль осей  $x$  и  $y$  для заданных размеров  $(40 \times 40)$ .

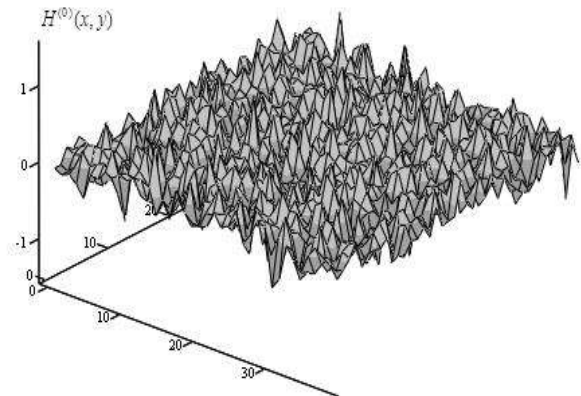


Рис. 1 – Поле «белого» шума  $H^{(0)}(x, y)$ ; параметры:  $N = 40, \Delta_x = 1, M = 40, \Delta_y = 1, \sigma = 0.2$

Анализируя рис. 1–3, видно, что при уменьшении значений парциальных декрементов  $v, \mu$  наблюдается сглаживание формы сгенерированного случайного поля. Можно отметить, что дополнения парциальных декрементов  $v, \mu$  влияют на вид топографии сгенерированного случайного марковского поля.

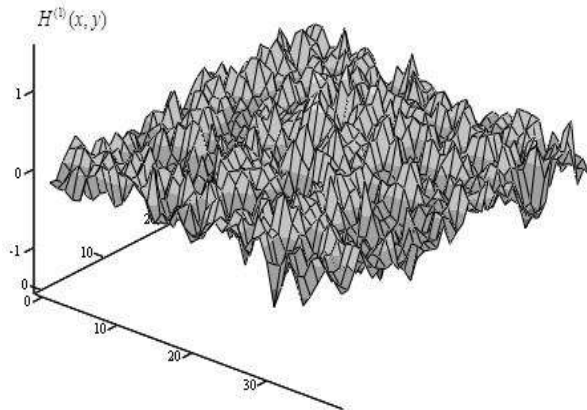


Рис. 2 – Нормальное марковское поле первого порядка  $H^{(1)}(x, y)$ ; параметры:  $N = 40$ ,  $\Delta_x = 1$ ,  $M = 40$ ,  $\Delta_y = 1$ ,  $\nu_1 = 0.8$ ,  $\mu_1 = 0.8$ ,  $\sigma = 0.2$

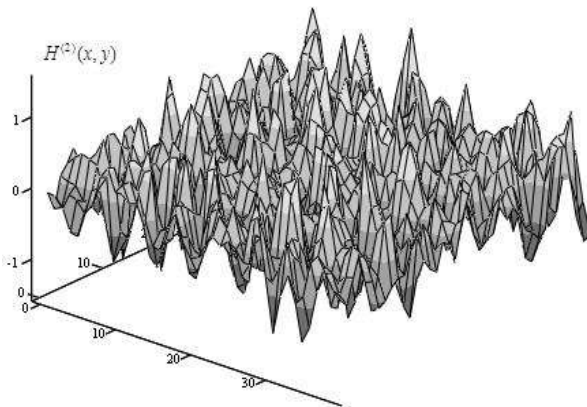


Рис. 3 – Нормальное марковское поле второго порядка  $H^{(2)}(x, y)$ ; параметры:  $N = 40$ ,  $\Delta_x = 1$ ,  $M = 40$ ,  $\Delta_y = 1$ ,  $\nu_2 = 1.6$ ,  $\mu_2 = 1.6$ ,  $\sigma = 0.2$

**Выводы.** В данной работе описан алгоритм повышения порядка случайного объекта – нормального марковского поля, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными ОУ-процессами. Аналогичные утверждения могут быть сформулированы для полей, которые генерируются в объеме и в пространстве высшей размерности.

Построены нормальные марковские поля нулевого, первого и второго порядка, реализованные на плоской поверхности двух переменных.

**Список литературы:** 1. Habibi A. Two-Dimensional Bayesian Estimate of Image / A. Habibi // Proc. IEEE, vol. 60, № 7, pp.878–883, (July) 1972. 2. Тихонов В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов – М. : Сов. радио, 1977. – 488 с. 3. Хусу А. П. Шероховатость поверхностей / А. П. Хусу, Ю. П. Витенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 344 с. 4. Ярлыков М. С. Статистическая теория навигации / М. С. Ярлыков. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с. 5. 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. 6. Мазманишвили А. С. Алгоритм генерации нормального марковского поля на поверхности идеального цилиндра / А. С. Мазманишвили // Електронне моделювання. – 1998. – Т. 20. – №. 6. – С. 65–69.

**Bibliography (transliterated):** 1. Habibi, A. Two-Dimensional Bayesian Estimate of Image. Proc. IEEE, vol. 60, № 7, pp.878–883, (July) 1972. 2. Tihonov, V. I., and M. A. Mironov. "Markovskie processy". Moscow: Sov. Radio, 1977. 488. Print. 3. Husu, A. P., Vitenberg, Yu. R., and V. A. Palmov. "Sherohovatost' poverhnosti". Moscow: Nauka, 1975. Print. 4. Yarlykov, M. S. "Statisticheskaya teoriya navigacii". Moscow: Radio i svyaz', 1985. Print. 5. Masmanishvili A. S. and A. Y. Sydorenko. "Povishenie porjadka dvumernih markovskih poley". Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Systemnyi analiz, upravlinnya ta informaciyini tehnologii. – Kharkiv : NTU "KhPI". No. 3 (977). 2013. 110–120. Print. 6. Masmanishvili A. S. "Algoritm generacii normal'nogo markovskogo polya na poverhnosti ideal'nogo cilindra". Elektronnoe modelirovanie. T. 20. № 2. 1998. 65–69. Print.

Поступила (received) 05.12.2015

**Мазманишвили Александр Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 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 National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

**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 Yuriyivna** – 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.

Н. Є. ХАЦЬКО

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТОЧНОСТІ ВИРІШЕННЯ ТЕРМІНАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ ВІД ВИБОРУ ПАРАМЕТРУ СИНТЕЗУ

Розглянуто у сукупності задачу управління та задачу ідентифікації вектору стану літального апарату. Показано побудову еталонної траєкторії руху та функцій програмного управління, діючих у польоті на літальних апарат. Здійснено синтез управління в замкненому контурі алгоритмом переслідування провідної точки за інформацією інерціальної навігаційної системи, датчики якої мають сталу похибку вимірювання. Отримано вирази для розрахунку термінальної похибки місцеположення літального апарату. Знайдено кореляцію між термінальною точністю та значенням параметру синтезу. Доведено, що точність приведення вектору стану в задану термінальну точку залежить від рівня збурень і похибки вхідної інформації. Сформульовано рекомендації щодо вибору параметру синтезу при проектуванні алгоритмів автоматичного управління рухом у комплексі з проектуванням інформаційно-вимірювальної системи.

**Ключові слова:** система управління, безплатформна інерціальна навігаційна система, похибка виміру вектору стану, динамічне збурення, точність термінального управління.

**Вступ.** Система автоматичного управління польотом (САУП) є з'єднанням окремих елементів в певну конфігурацію, що має причинно-наслідкові зв'язки між елементами і забезпечує задані характеристики [1], тому точність системи управління залежить від точності роботи усіх елементів системи. Навігаційну систему можна вважати одним з блоків САУП, оскільки ця система дає інформацію про поточні характеристики руху літального апарату (ЛА).

Сьогодні широко поширена навігація із застосуванням інтегрованих інерціально-спутникових навігаційних систем, які комплексують інформацію від супутникового приймача та інерціального блоку. Таке об'єднання дозволяє отримувати поточні навігаційні характеристики ЛА з необхідною точністю та частотою. Проте відомі недоліки супутникових навігаційних систем (в реальних умовах велика вірогідність спотворення сигналу впродовж деякого періоду часу, період готовності приймача супутникових сигналів є досить тривалим, невіддале взаємне розташування супутників і так далі) змушують в окремі періоди функціонування покладатися тільки на блок інерціальної навігаційної системи (ІНС). З цих причин існують вимоги [2], відповідно до яких навігаційна система повинна працювати із заявленою точністю впродовж не менше 10 хвилин тільки за інформацією ІНС. Таким чином, розгляд спільної роботи САУП і ІНС є актуальним завданням, вирішення якого дозволяє розглянути вплив похибок ІНС на похибки управління.

У цій роботі, як вимірювальний блок САУП, розглядається безплатформна інерціальна навігаційна система (БІНС), чії характеристики точності прямо впливають на роботу усієї системи. Відомо [3], що в сеансі роботи БІНС накопичує похибки оцінювання параметрів ЛА, це викликано інтеграцією помилок вимірів інерціальних датчиків.

На практиці часто виникають завдання щодо виконання польоту ЛА в задану точку простору із заданими параметрами руху за відведений час. Це є так звані термінальні задачі. Найкращим вирішенням термінальної задачі в алгоритмічному сенсі є отримання явних аналітичних залежностей для управляючих функцій [4].

### Постановка термінальної задачі та загальний алгоритм рішення

У початковий момент часу ЛА знаходиться у відомій точці простору і має відомі характеристики:

$$\bar{r}_0 = \{x_0, y_0, z_0\}^T, \quad V_0, \theta_0, \psi_0, \quad (t=0), \quad (1)$$

де:  $\bar{r}_0$  – координати ЛА в ортогональній системі,  $V$  – швидкість ЛА,  $\theta$  – кут нахилу траєкторії,  $\psi$  – кут шляху.

Необхідно за обмежений завданням час  $T$  виконати політ ЛА в задану точку простору, в якій характеристики ЛА також повинні відповідати заданим значенням:

$$\bar{r}_T = \{x_T, y_T, z_T\}^T, \quad V_T, \theta_T, \psi_T, \quad (t=T). \quad (2)$$

Для вирішення завдання вибрана замкнена схема управління, яку відображено на рис. 1.

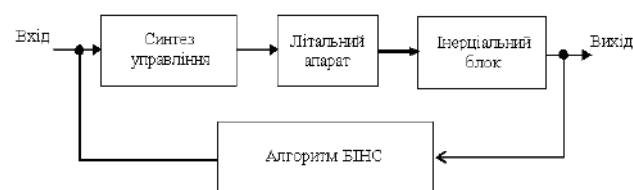


Рис. 1 – Схема САУП

### Математична модель руху ЛА і вибір управляючих функцій

Динаміка ЛА в ортогональній СК визначена сукупністю рівнянь [6]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta \cos \psi, & \dot{y} &= V \sin \theta, & \dot{z} &= V \cos \theta \sin \psi, \\ \dot{V} &= g(n_x - \sin \theta), & \dot{\theta} &= \frac{g}{V}(n_y \cos \gamma - \cos \theta), \\ \dot{\psi} &= \frac{g}{V \cos \theta} n_y \sin \gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $x, y, z$  – координати місця розташування ЛА в ортогональній топоцентричній системі координат (СК),  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\gamma$  – кут крену ЛА,  $n_x, n_y$  – тангенціальна і нормальна складові перевантаження, визначувані виразами:

$$n_x = \frac{P \cos(\alpha + \alpha_p) + Y}{mg}, \quad n_y = \frac{P \sin(\alpha + \alpha_p) + Y}{mg}, \quad (4)$$

у яких:  $m$  – маса ЛА,  $P$  – сила тяги,  $X$  – сила лобового опору,  $Y$  – аеродинамічна підйомна сила,  $\alpha$  – кут атаки крила,  $\alpha_p$  – відомий з конструкторської документації настановний кут осі двигуна по відношенню до подовжньої осі ЛА.

Необхідно отримати закон управління рухом ЛА, під дією якого об'єкт переводиться із стану (1) в стан (2) за час  $T$ .

Модель (4) є не єдино можливою, проте перевага такого представлення у відносній простоті виразів. Залежність між проекціями сил, що діють на ЛА, і кривизною його траєкторії у вертикальній і горизонтальній площинах, закладена в (4), робить модель наочною і зручною в застосуванні. Оберемо закон управління як сукупність функцій, які мають пряме відношення до роботи виконавчих пристроїв: тяга двигунів  $P(t)$ , кути атаки  $\alpha(t)$  і крену  $\gamma(t)$  ЛА.

#### Формування еталонної траєкторії руху і синтез програмного закону управління ЛА

Спочатку отримуємо аналітичні залежності управляючих функцій для вирішення завдання в розімкненому контурі, що відповідає програмному управлінню. Для цього застосуємо метод зворотних задач динаміки, який полягає у визначенні законів управління рухом динамічних систем і їх параметрів за умови здійснення руху по призначеній траєкторії. Таким чином, потрібне знання траєкторії руху ЛА, тобто закону зміни координат ЛА.

У проекціях на осі топоцентричної СК керований незбурений рух центру мас ЛА описується диференціальними рівняннями:

$$\ddot{\vec{r}}(t) = \vec{u}(t), \quad (5)$$

де  $\vec{r}(t)$  – координати об'єкта,  $\vec{u}(t)$  – шукане прискорення, що управляє та відповідає руху в кінцеву точку. У початковий ( $t = 0$ ) і кінцевий ( $t = T$ ) моменти часу стан керованого об'єкта характеризується значеннями координат і швидкостей:

$$\vec{r}(0) = \vec{r}_0, \quad \dot{\vec{r}}(0) = \dot{\vec{r}}_0, \quad (6)$$

$$\vec{r}(T) = \vec{r}_T, \quad \dot{\vec{r}}(T) = \dot{\vec{r}}_T. \quad (7)$$

Знайдемо просторову криву, яка сполучає початкову (6) і кінцеву (7) точки руху, а також формульну залежність для визначення управляючої дії для здійснення руху по траєкторії.

Рішення (5) шукатимемо, як рішення задачі

$$\int_0^T \vec{u}^2(t) dt = \int_0^T \vec{r}^2(t) dt \rightarrow \min_{u_i}$$

на множині функцій, що задовольняють крайовим умовам (6), (7). Рівняння Ейлера-Пуассона для знаходження екстремуму функціонала має вигляд:

$$\vec{r}^{(n)}(t) = 0,$$

і його рішенням є функція поліноміального виду:

$$\vec{r}(t) = \vec{b}_3 \cdot t^3 + \vec{b}_2 \cdot t^2 + \vec{b}_1 \cdot t + \vec{b}_0. \quad (8)$$

Коефіцієнти  $\vec{b}_i$ ,  $i = \overline{0,3}$  визначаються з умови узгодження рішення (8) з крайовими умовами (6), (7), що призводить до системи алгебраїчних рівнянь, яка має рішення:

$$\begin{aligned} \vec{b}_0^i &= \vec{r}_0^i, \\ \vec{b}_1^i &= \dot{\vec{r}}_0^i, \\ \vec{b}_2^i &= \frac{3(\vec{r}_T^i - \vec{r}_0^i)}{T^2} - \frac{\dot{\vec{r}}_T^i + 2\dot{\vec{r}}_0^i}{T}, \\ \vec{b}_3^i &= \frac{2(\dot{\vec{r}}_0^i - \dot{\vec{r}}_T^i)}{T^3} + \frac{\dot{\vec{r}}_T^i + \dot{\vec{r}}_0^i}{T^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Функція  $\vec{u}(t)$  дозволяє реалізувати рух з (6) в (7), по суті, є прискоренням центру мас ЛА і має вигляд

$$\vec{u}(t) = 6\vec{b}_3 t + 2\vec{b}_2. \quad (10)$$

Таким чином, за заданих крайових умов, просторова траєкторія руху ЛА визначена, як (8) з урахуванням (9).

Для шуканого набору функцій маємо аналітичні залежності [6]:

$$P = \sqrt{(m \cdot g \cdot n_x + X)^2 + (m \cdot g \cdot n_y - Y)^2}, \quad (11)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{m \cdot g \cdot n_y - Y}{m \cdot g \cdot n_x + X}\right) - \alpha_p, \quad (12)$$

$$\gamma = \arctg \frac{\dot{\psi} \cdot \cos \theta}{\dot{\theta} + \frac{g}{V} \cos \theta}. \quad (13)$$

При обчисленні (11)–(13) необхідно використовувати наступні вирази:

– траєкторні координати:

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}, \quad \theta = \arcsin\left(\frac{\dot{y}}{V}\right), \quad (14)$$

$$\psi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{\dot{z}}{\dot{x}}\right), & \text{при } \dot{x} \geq 0, \\ \arctg\left(\frac{\dot{z}}{\dot{x}}\right) + \pi, & \text{при } \dot{x} < 0; \end{cases} \quad (15)$$

– їх похідні:

$$\dot{V} = \frac{\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{z}\ddot{z}}{V}, \quad \dot{\theta} = \frac{\ddot{y} - \dot{V} \sin \theta}{V \cos \theta}, \quad (16)$$

$$\dot{\psi} = \begin{cases} \frac{\dot{V} \cos \theta \cos \psi - V \dot{\theta} \sin \theta \cos \psi - \ddot{x}}{\dot{z}}, & |\cos \psi| < \frac{1}{2}, \\ \frac{-\dot{V} \cos \theta \sin \psi + V \dot{\theta} \sin \theta \sin \psi + \ddot{z}}{\dot{x}}, & |\cos \psi| \geq \frac{1}{2}; \end{cases} \quad (17)$$

– складові перевантаження:

$$n_x = \sin \theta + \frac{\dot{V}}{g}, \quad n_y = \frac{1}{\cos \gamma} \left( \frac{V\dot{\theta}}{g} + \cos \theta \right). \quad (18)$$

Координати є складовими вектору  $\bar{r} = (x, y, z)^T$  і їх похідні обчислюються з (8) з урахуванням (9) як

$$\begin{aligned} \dot{\bar{r}}(t) &= 3\bar{b}_3 \cdot t^2 + 2\bar{b}_2 \cdot t + \bar{b}_1, \\ \ddot{\bar{r}}(t) &= 6\bar{b}_3 \cdot t + 2\bar{b}_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Таким чином, отримане аналітичне рішення (11)–(13) задає закон еталонного управління, що викликає рух ЛА по еталонній траєкторії.

### Синтез закону управління в замкненому контурі

Реальний рух ЛА має відхилення, що впливають на стан ЛА. Відхилення від ідеальних значень в розрахунках можуть виникати в результаті: спотворення початкових умов руху; формування динамічних сил з деякою похибкою від необхідних значень; неточного знання конструктивних параметрів ЛА (площі обтічних поверхонь, маси ЛА та інших величин, що змінюються); об'єктивних обмежень на значення управляючих функцій в слідстві чого не вдається надати ЛА необхідні параметри руху; інших чинників, що тягнуть похибки в параметрах системи.

Особливістю управління з синтезом є оновлення інформації про реальні параметри руху ЛА на кожному такті роботи САУП, що дозволяє організувати обчислення управляючих дій з урахуванням поточних значень координат і швидкостей ЛА.

Для синтезу управління обрано метод переслідування провідної точки, який дозволяє долати невизначеність в околиці термінальної точки за рахунок віртуального продовження програмної траєкторії. Суть методу полягає у виборі деякої точки на еталонній траєкторії, яка знаходиться від поточної на величину тимчасового інтервалу  $\tau$  (глибини прогнозу). В цьому випадку керована точка і точка, що веде, підкоряються одному закону руху (5). Це дає можливість зв'язати їх новою траєкторією, по якій і синтезуються нові управляючі дії.

На кожному наступному такті роботи САУ провідна точка зміщується уздовж програмної траєкторії на величину заданого кроку роботи САУП – «біжить» по еталонній траєкторії. Реальні параметри стану ЛА під впливом обурень можуть не лежати на програмній траєкторії, але вони відомі, бо визначаються алгоритмом БІНС. Таким чином, на кожному такті роботи САУ синтезується нова траєкторія, яка починається в поточній точці місцеположення ЛА та закінчується в точці на еталонній траєкторії. Рух уздовж цієї траєкторії приведе до досягнення мети управління. Вчислені значення (11)–(13) впливають на об'єкт до наступного такту роботи САУП, коли будуть отримані нові значення параметрів стану ЛА і управляючих функцій.

Рис. 2 ілюструє відхилення точки від еталонної траєкторії та нову проміжну траєкторію. Цей метод спрямований на повернення об'єкта на еталонну траєкторію у разі його можливого відхилення, оскільки ідентифікація і зміщення переслідуваної точки дає можливість стеження за близькістю реальної траєкторії руху до призначеної.

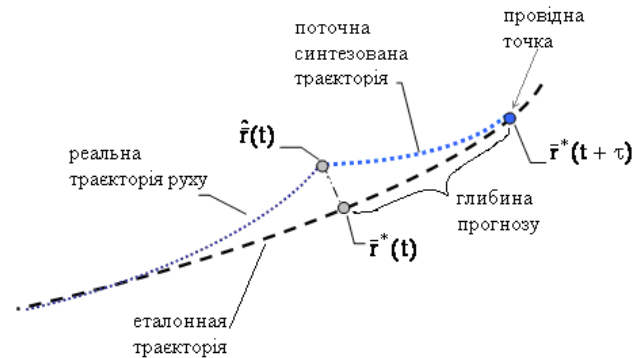


Рис. 2 – Відхилення реального руху від от еталонної траєкторії

Для простоти викладу методу синтезу далі розглядається одновимірний лінійний випадок.

Нехай керований рух по проміжній траєкторії описується аналогічно (5):

$$\ddot{r}(t') = u(t'), \quad (20)$$

з наступними крайовими умовами:

$$\begin{aligned} r(0) &= r(t), & \dot{r}(0) &= \dot{r}(t), \\ r(\tau) &= r^*(t + \tau), & \dot{r}(\tau) &= \dot{r}^*(t + \tau), \end{aligned}$$

де  $t' \in [0, \tau]$  – змінна часу при русі по проміжній траєкторії;  $r(t)$ ,  $\dot{r}(t)$  – оцінки координати і швидкості ЛА алгоритмом БІНС. Верхнім індексом «\*» тут і далі позначені величини, пов'язані з еталонним рухом. Час  $\tau$  є фіксованим значенням для усього періоду  $T$  – руху до термінальної точки.

Рівняння, що визначають синтезовану проміжну траєкторію, швидкість ЛА і управління, мають вигляд:

$$\begin{cases} r(t') = a_3 t'^3 + a_2 t'^2 + a_1 t' + a_0, \\ \dot{r}(t') = 3a_3 t'^2 + 2a_2 t' + a_1, \\ u(t') = 6a_3 t' + 2a_2, \end{cases} \quad (21)$$

де коефіцієнти визначаються виразами:

$$\begin{aligned} a_0 &= r(t), & a_1 &= \dot{r}(t), \\ a_2 &= \frac{3(r^*(t + \tau) - r(t))}{\tau^2} - \frac{\dot{r}^*(t + \tau) + 2\dot{r}(t)}{\tau}, \\ a_3 &= \frac{2(r(t) - r^*(t + \tau))}{\tau^3} + \frac{\dot{r}^*(t + \tau) + \dot{r}(t)}{\tau^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Використання (21), (22) в обчисленні функцій  $P(t)$ ,  $\alpha(t)$  і  $\gamma(t)$  по вище приведених формулах (11)–(13) обмежено початковим моментом руху по

проміжній траєкторії, що дозволяє записати результуючий закон управління в замкненій системі:

$$u(t, r, \dot{r}) = 6 \cdot \frac{r^*(t+\tau) - r(t)}{\tau^2} - 2 \cdot \frac{\dot{r}^*(t+\tau) + 2 \cdot \dot{r}(t)}{\tau}. \quad (23)$$

Таким чином, закон (23) дозволяє управляти польотом ЛА з урахуванням реального вектору стану, забезпечуючи близькість реальної траєкторії польоту до еталонної, яка, у свою чергу, приводить в задану кінцеву точку.

#### Аналіз точності замкненої системи управління

Для аналізу ефективності вибраної схеми синтезу дослідимо замкнену систему управління з точки зору можливості реалізації термінальних умов.

Розглядати в загальному аналітичному вигляді точність досягнення термінальних умов для просторової моделі руху є не можливим через не лінійність та складність виразів. Але зазначимо, що управління (11)–(13) нелінійної системи (3) залежить від управління (23), отриманого для лінійного завдання (5). Також, нелінійна система стає лінійною, якщо розглядати прямолінійний політ уздовж горизонтальної осі координат. Тому представляється можливим розглянути простий випадок руху, що відповідає прямолінійному руху.

Особливість цього розгляду полягає в тому, що управління формується за інформацією, похибка якої певним чином залежить від похибок датчиків. Разом з цим, параметри реального руху ЛА,  $r(t)$ ,  $\dot{r}(t)$  можуть не відповідати параметрам еталонного руху (5), тому розглянемо рух з обмеженим обуренням  $f(t)$ , який описується рівнянням

$$\ddot{r}(t) = u(t) + f(t), \quad |f| \leq f^*. \quad (24)$$

Тоді управління (23) можна розглядати як суму еталонної дії і похибки управління, викликаного відхиленням об'єкта:

$$u(t, r, \dot{r}) = u^*(t) + \delta u(t, \delta r, \delta \dot{r}), \quad (25)$$

де

$$\delta u(t) = -\frac{6}{\tau^2} \delta r(t) - \frac{4}{\tau} \delta \dot{r}(t), \quad (26)$$

а  $\delta r = r - r^*$ ,  $\delta \dot{r} = \dot{r} - \dot{r}^*$  – відповідно, координатна і швидкісна похибка реалізації програмного руху.

У цих умовах рівняння похибки управління

$$\delta \ddot{r}(t) = \delta u + f(t)$$

з урахуванням (26) наводиться до виду

$$\delta \ddot{r}(t) + \frac{4}{\tau} \delta \dot{r}(t) + \frac{6}{\tau^2} \delta r(t) = f(t). \quad (27)$$

Включення в замкнену САУП вимірювального пристрою для оцінки реальних параметрів руху ЛА призводить до необхідності враховувати похибки цього пристрою при дослідженні похибок управління

рухом. Введемо в спрощеному виді похибки БНС в рівняння похибок САУП (27).

Вважатимемо, що початковим виміром є величина  $a(t) = \ddot{r}(t) + \delta a$ , що відповідає сумі істинного прискорення і сталої похибки  $\delta a$ , а оцінка вектору стану  $(r, \dot{r})$  робиться, згідно з принципом інерціального зчислення [3], шляхом подвійної інтеграції вимірів. Розглянутий випадок є характерним для роботи БНС, в якій похибка  $\delta a$  складається з похибки власне акселерометра і похибки компенсації вектору прискорення вільного падіння, обумовленою похибкою гіроскопів. У деяких режимах руху ЛА сукупну похибку можна вважати сталою.

З урахуванням  $\ddot{r}(t) = a(t)$  для оцінки  $r, \dot{r}$  співпадаючої в початковий момент часу з фактичними значеннями однойменних змінних, маємо

$$\dot{r}(t) = \dot{r}(t) + \delta a \cdot t, \quad r(t) = r(t) + \delta a \cdot \frac{t^2}{2},$$

Таким чином, після підстановки (26), (27) в закон управління (23), для замкненої системи рівняння похибка реалізації еталонного руху набирає вигляду

$$\delta \ddot{r}(t) + \frac{4}{\tau} \delta \dot{r}(t) + \frac{6}{\tau^2} \delta r(t) = -\frac{4\delta a}{\tau} \cdot t - \frac{3\delta a}{\tau^2} \cdot t^2 + f(t). \quad (28)$$

У початковий момент часу  $\delta r(0) = 0, \delta \dot{r}(0) = 0$ , тоді рівняння (28) має рішення

$$\delta r(t) = -\frac{\delta a}{2} t^2 + \frac{\delta a}{6} \tau^2 - e^{-\frac{2}{\tau} t} \frac{\delta a}{3} \tau^2 \left( \frac{1}{2} \cos \frac{\sqrt{2}}{\tau} t + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\sqrt{2}}{\tau} t \right) + \delta r^f(t). \quad (29)$$

Абсолютне значення змінної  $\delta r(t)$  в (29) необмежено росте зі збільшенням часу  $t$ , що пояснюється накопичуванням характером похибки ідентифікації вектору стану. Дійсно (рис. 3), залежність  $\delta r(t)$  при  $f(t) \equiv 0$ , отримана для різних значень глибини прогнозу  $\tau$ , демонструє згадану закономірність.

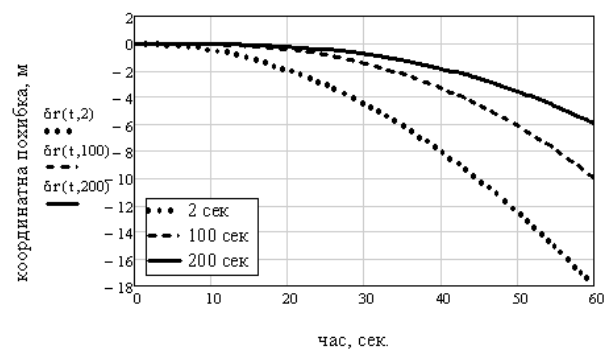


Рис. 3 – Збільшення координатної похибки САУП при різних значеннях  $\tau$

Зазначимо, що глибина прогнозу  $\tau$  є вільним параметром закону управління (23). З рівняння (29) видно, що чим більше  $\tau$ , тим менше за інших рівних

умов вплив  $\delta a$  на динаміку  $\delta r$ . Так, при  $\delta a = 0.08 \text{ м/с}^2$  і тривалості руху  $T = 60 \text{ с}$ , модуль термінальної похибки  $|\delta r(t)|$  для параметра  $\tau$ , рівного  $2 \text{ с}$ ,  $100 \text{ с}$  і  $200 \text{ с}$ , досягає значень  $18 \text{ м}$ ,  $10 \text{ м}$  і  $6 \text{ м}$  відповідно. Вказана закономірність зберігається і при інших значеннях  $T$ .

Розглянемо (29) за відсутністю динамічного збудження ( $f(t) \equiv 0$ ), сталої похибки ( $\delta a \neq 0$ ) та зміни параметру  $\tau$  від  $0,01 \text{ с}$  до  $10^4 \text{ с}$ . Тоді (29) набуває вигляду

$$\delta r_T^{\delta a}(\tau) = -\frac{\delta a}{2} T^2 + \frac{\delta a}{6} \tau^2 - e^{-\frac{2}{\tau} T} \frac{\delta a}{3} \tau^2 \left( \frac{1}{2} \cos \frac{\sqrt{2}}{\tau} T + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\sqrt{2}}{\tau} T \right). \quad (30)$$

На рис. 4 представлені результати двох комп'ютерних експериментів з термінальною тривалістю  $T = 100 \text{ с}$  і  $T = 200 \text{ с}$ . При малих значеннях  $\tau$  величина похибки при загальному часі руху

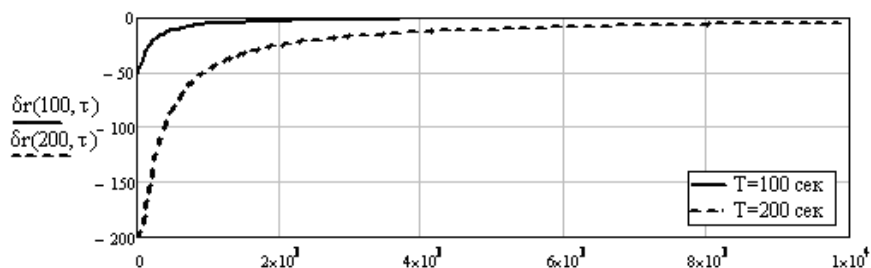


Рис. 4 – Залежність координатної похибки в термінальній точці від глибини прогнозу

Рекомендації наступні: якщо інформаційно-вимірювальна система забезпечує отримання координат і швидкості об'єкта з високою точністю, то вибраний параметр синтезу має бути мінімальним, навпаки, при використанні датчиків низької точності параметр синтезу слід збільшити. Результати комп'ютерних експериментів підтверджують надані висновки.

**Список літератури:** 1. Теория управления. Терминология. – М. : Наука, 1988. – Вып. 107. – 56 с. 2. Performance Specification Dynamic Reference Unit HYBRID (DRUH) / INCH-POUND MIL-PRF-71185 (AR) 30 July 1999. – 237 p. 3. Хацько Н. Е. Исследование возможности управления полетом по данным инерциальных датчиков низкого класса точности. / Н. Е. Хацько // Проблеми машинобудування. – Харків : ПІМАШ, – 2013. – Т. 16, № 5. – С. 32–35. 4. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации / П. В. Бромберг. – М. : Наука, 1979. – 296 с. 5. Голован А. А. Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. /

$T = 100 \text{ с}$  досягає  $50 \text{ м}$ , а при  $T = 200 \text{ с}$  –  $200 \text{ м}$ , що обумовлено першим доданком у (30). Зі збільшенням значення  $\tau$ , похибка зменшується і при великих значеннях глибини прогнозу  $\tau$  наближається до нуля. При цьому, з (30) нескладно показати, що для будь-якого термінального часу  $T$  має місце  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} (\delta r_T(\tau)) = 0$ .

**Висновки.** В роботі отримані аналітичні вирази залежності термінальної похибки управління від узагальненої похибки виміру вектору стану і рівня динамічного обурення.

Проведено дослідження точності функціонування замкненої системи управління в одновимірному випадку, де було виявлено принципову можливість нівелювання впливу динамічного збудження і похибок вимірів БІНС за допомогою зміни параметра синтезу.

За результатами аналізу термінальної точності функціонування замкненої системи можна надати рекомендації щодо вибору варійованого параметра в законі синтезу по методу переслідування провідної точки.

А. А. Голован, Н. А. Парусников. – М. : Изд-во МГУ, 2011. – 132 с. 6. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели / П. Д. Крутько – М. : Наука, 1987. – 304 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Teoriya upravleniya. Terminologiya. – Moscow: Nauka, 1988. Print. 2. Performance Specification Dynamic Reference Unit HYBRID (DRUH) / INCH-POUND MIL-PRF-71185 (AR) 30 July 1999. – 237 p. 3. Khatsko, N. Ye. "Issledovanie vozmozhnosti upravleniya poletom po dannym inertsialnykh datchikov nizkogo klassa tochnosti." *Problemi mashinobuduvannya*. Kharkiv: IPMAsh, T. 16.5. 2013. 32–35. Print. 4. Bromberg, P. V. *Teoriya inertsialnykh sistem navigatsii* Moscow: Nauka, 1979. Print. 5. Golovan, A. A., Parusnikov, N. A. *Matematicheskie osnovy navigatsionnykh sistem. Chast I. Matematicheskie modeli inertsialnoy navigatsii*. Moscow: Izd-vo MGU, 2011. Print. 6. Krutko P. D. *Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemykh sistem. Lineynye modeli*. Moscow: Nauka, 1987. Print.

Надійшла (received) 05.02.2015

**Хацько Наталія Євгенівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри систем та процесів управління; тел.: (050) 198-80-58; e-mail: n.khatzko@gmail.com

**Khatsko Nataliya Evgenivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of Systems and Processes of Control Department; tel.: (050) 198-80-58; e-mail: n.khatzko@gmail.com



С. В. ЛУБЕНЕЦ, Е. П. ПАВЛЕНКО, Е. Н. ХАРЦИЙ

## ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН СПРОСА (ПРЕДЛОЖЕНИЯ) В СИЛЬНЫХ ЦЕНОВЫХ ТРЕНДАХ

Предлагаются методы поиска на временных ценовых графиках высоко вероятных участков (зон) разворота цены при наличии сильных рыночных тенденций. В качестве эффективного инструмента определения таких зон предложено использование специального ценового графического формирования в виде коррекционного пинбара. Решение указанной проблемы увеличивает вероятность успешности заключенных на открытых рынках торговых сделок, а также способствует повышению прибыльности торгово-инвестиционной деятельности в целом.

**Ключевые слова:** торгово-инвестиционная деятельность, зона спроса, зона предложения, ценовой тренд, торговая стратегии Price action, пинбар.

**Введение.** В последние годы с появлением сети Интернет и развитием автоматизированных торговых систем широкую популярность и актуальность приобрела автоматизированная торговоинвестиционная деятельность на фондовых, валютных и товарных рынках. При этом одним из важных факторов успешности инвестирования является способность финансовых аналитиков и инвесторов определять преобладающие тенденции (тренды) на этих рынках, а также вести эффективную торговую деятельность в направлении этих тенденций. Это действительно очень важно. Ведь известно, что трендовое движение

цены является основным источником доходов трейдеров, принося им большую часть прибыли, которую они могут получить на рынке. Поэтому именно при наличии сильных ценовых трендов актуальным является рассмотрение проблемных вопросов поиска и реализации наиболее прибыльных инвестиционных сделок, основанных на высоковероятном определении на ценовом графике специальных зон спроса или предложения.

**Постановка проблемы.** Рассмотрим фрагмент ценового временного ряда, где цена пребывает в доминирующем восходящем тренде (рис. 1).



Рис. 1 – Ценовые импульсы и коррекции в тренде

Здесь в прямоугольниках показаны участки свечного ценового графика, которые представляют собой сильные ценовые импульсы в направлении доминирующего тренда. Оставшиеся участки графика – это ценовые откаты (коррекции), где цена делает паузу перед началом следующего импульса. Горизонтальными сплошными линиями отмечены так называемые уровни спроса: уровни, где спрос на рынке существенно превысил предложение, т.е. возник сильный дисбаланс между спросом и предложением, в результате чего цена развернулась и ушла вверх. Соответственно, горизонтальными пунктирными линиями отмечены уровни предложения, где наоборот, предложение превысило спрос, а цена развернулась вниз и перешла в фазу коррекции. В реальности же, из-за имеющего место ценового разброса, эти уровни спроса (предложения) представляют собой не точные тонкие линии, а некие размытые участки (зоны) определенной ширины.

Согласно одной из наиболее эффективных торгово-инвестиционной стратегии Price action (движение цены) [1–3] считается, что момент, когда коррекция цены достигает начала предыдущего ценового импульса, т.е. зоны спроса или предложения, является наиболее вероятным моментом для начала открытия торговых сделок. Это вызвано тем, что в такие моменты из-за наличия сильного дисбаланса на рынке наиболее высока вероятность разворота цены. При этом инвестиционный риск достигает минимума, а потенциальная прибыль от заключенной сделки максимальна. Как раз именно эти требования в трейдинге являются важнейшими условиями его среднестатистической прибыльности на длительной временной дистанции.

В стратегии Price action, при выполнении определенных условий, начало каждого сильного ценового импульса представляет собой или так называемую зону спроса (базу) типа DBR (Drop–Base–Rally,

Снижение–База–Рост) для растущего тренда, или зону предложения типа RBD (Rally–Base–Drop, Рост–База–Снижение) – для падающего тренда [4]. В таких базах имеет место существенный дисбаланс между спросом и предложением на рынке, что является решающим фактором возможного разворота ценового движения в случае достижения ценой этих баз.

Однако анализ движения цены на приведенном выше ценовом графике при наличии сильной тенденции показал ряд некоторых особенностей трендов. Так, на приведенном фрагменте восходящего тренда видно (см. рис. 1), что ни одна из всех ценовых коррекций так и не достигла в своём откате начала предыдущих ценовых импульсов текущего временного интервала (таймфрейма или ТФ), т. е. баз типа DBR. Это означает, что трейдеры и инвесторы так и не дождались бы наиболее благоприятного момента для заключения своих заранее запланированных торговых сделок. В итоге тренд продолжился бы без их выхода на рынок, обеспечивая этим трейдерам в целом убыточную статистику их торгово-инвестиционной деятельности.

В лучшем случае у трейдеров была бы только возможность заключать торговые сделки внутри весьма ненадёжных и малоприбыльных коррекционных ценовых коридоров, где откаты цены обычно достигают баз типа DBR или RBD. Ведь внутри этих коридоров ценовые импульсы существенно уступают по своей мощности движения основным трендовым импульсам, а сами базы DBR или RBD на краях коррекционного коридора часто пробиваются ценой.

В связи с этим в сильных ценовых трендах важной является проблема более точного определения разворотных участков (зон), поскольку такие зоны, обычно не совпадая с началом трендовых ценовых импульсов, приводят к преждевременному развороту цены, не давая ей достигнуть начала этих импульсов.

**Анализ состояния проблемы.** Известно [1], что цена часто откатывается к началу импульса только либо в самом начале нового тренда, когда большинство трейдеров в нём ещё не уверены (или даже не замечают его зарождения), или же в конце «старого» тренда, когда цена входит в рынок уже поздно и опасно, поскольку цена достигла более сильной базы на большем таймфрейме, и возможен разворот тренда.

В связи с этим важным является поиск ответа на следующий вопрос: где следует ожидать завершения коррекции, т.е. где следовало бы входить в сделки в рассматриваемом примере на рис. 1, когда тренд был в разгаре? Авторами выдвинуто предположение, что в сильном тренде откат цены происходит преимущественно не до указанных выше ценовых зон DBR (RBD), а до зон другого типа: зон спроса RBR (Rally–Base–Rally, Рост–База–Рост) для растущего тренда, или до зон предложения DBD (Drop–Base–Drop, Снижение–База–Снижение) – для падающего тренда. В рассматриваемом примере видимо коррекция выполнялась до баз типа RBR, находящихся внутри ценовых импульсов рабочего таймфрейма, поэтому практически не видимых на рис. 1. Следовательно, инвестиционным аналитикам при поиске участков

потенциального завершения коррекции и разворота цены следует направлять свои усилия на высоковероятное определение именно таких баз типа RBR или DBD.

Следующим проблемным моментом рассматриваемого примера является то, что начало каждого ценового импульса на рис. 1 – это уже 2-й, 3-й или даже четвёртый тест соответствующего отмеченного уровня спроса. Согласно торговой стратегии Price action это значит, что даже если бы цена достигла начала ценового импульса, запланированный в этом месте вход в сделку будет осуществляться далеко не при первом тестировании уровня, что существенно снижает вероятность разворота цены от такой базы. В итоге, это снижает также и вероятность успешности заключаемой торговой сделки, поскольку при каждом последующем тестировании базы вероятность того, что эта база устоит и развернёт цену, снижается.

Однако если все эти ценовые движения были уже тестами, то где же тогда расположен истинный исходный источник спроса, заставивший цену развернуться при первом его тесте? Предполагается, что он заключён именно в зоне спроса типа RBR, находящейся внутри предыдущего ценового импульса.

Наконец, из рис. 1 видно, что при наличии восходящего тренда покупка от баз типа DBR была возможна только в коррекции, когда цена двигалась в коррекционном коридоре. Однако известно [1], что такая торговля опасна ложным пробоем зоны спроса перед началом следующего восходящего импульса. Здесь также важным является поиск ответа на вопрос: до какого ценового уровня происходит этот ложный пробой? Предположительно до уровня существенного спроса, находящегося на ценовом графике левее, в базе типа RBR внутри предыдущего ценового импульса.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при наличии сильного тренда важнейшим является способность трейдеров и инвесторов определять базы типа RBR (DBD), расположенные внутри ценовых импульсов рабочего таймфрейма, но практически не видимые на нём. Поэтому, для успешности поиска таких баз рекомендуется использовать таймфреймы, ниже рабочего. Причём, на меньших таймфреймах эти базы вполне могут выглядеть как базы типа DBR (RBD).

По утверждению практикующих на рынках трейдеров и профессиональных аналитиков [1], база является паузой в динамике цен. Причём в сильном тренде эта пауза может быть в виде всего только одной «свечи» перед продолжением тенденции. Или же более того – когда внутри сильного импульса имеет место широкодиапазонная трендовая «свеча» с откатным «фитилём», то этот «фитиль» и есть той паузой. А если время паузы значительно меньше рабочего таймфрейма, то такой базы трейдеры могут вообще не заметить на этом ТФ, что существенно усложняет её поиск и идентификацию.

Определив же местонахождение на ценовом графике этих базы, инвесторам следует брать на себя

риск агрессивной торговли от них при выполнении всех прочих условий качества базы (так называемых усилителей дисбаланса) торговой стратегии Price action [4].

**Метод решения проблемы.** В данной работе проблему поиска важных, но скрытых внутри сильного ценового импульса рабочего таймфрейма, баз типа RBR (DBD) предлагается решать путём использования в качестве помощника саму цену, а именно – известное формирование в виде специальной «японской свечи» под названием «пинбар» [1–4] (рис. 2). Причём это должен быть пинбар, который сформировался на рабочем таймфрейме в момент завершения коррекционного отката цены и расположен на локальной вершине (максимуме) ценового графика при падающем тренде или на локальном основании (минимуме) графика – при растущем тренде.

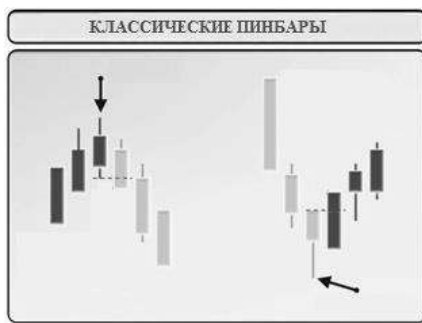


Рис. 2 – Классические пинбары на вершине и в основании «свечного» ценового графика

Часто именно такие пинбары являются хорошей возможностью вступить в торговлю, поскольку они

обычно как раз и представляют собой тест предшествующей зоны спроса или предложения. В нашем случае – зоны типа RBR или DBD.

Действительно, а иначе почему тогда цена вдруг развернулась в середине предыдущего ценового импульса, не достигнув его начала и образовав такой пинбар? Предположительно потому, что на уровне «фитиля» пинбара уже была ранее сформированная в предыдущем ценовом импульсе база типа RBR (DBD), невидимая на рабочем таймфрейме, однако, как правило, хорошо различимая на меньших таймфреймах.

Таким образом, пинбар как бы демаскирует, «проявляет» трейдерам скрытую базу. Причем известно, что для большей надёжности следует ориентироваться на пинбары, сформированные на больших таймфреймах: на H1 (одночасовом), на H4 (4-часовом), а лучше всего – на D1 (дневном). А дальше, для открытия сделки за трендом, можно использовать одну из известных методик входа по пинбару: по откату к 50 % пинбара, по пробую его основания или же каким-либо иным способом. Например, выполняя более детальное уточнение места открытия торговой позиции на мелких таймфреймах.

Для подтверждения работоспособности предложенного метода определения зон спроса (предложения) с помощью откатных пинбаров рассмотрим пример сильного падающего тренда валютной пары EUR/USD на дневном ценовом графике, показанном на рис. 3.

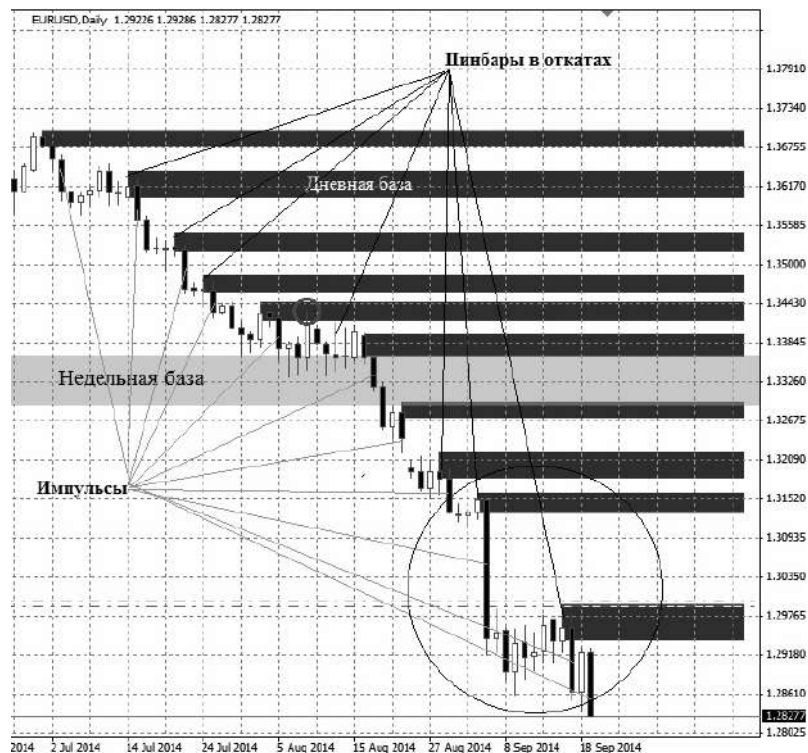


Рис. 3 – Ценовые импульсы и откаты тренда на дневном графике валютной пары EUR/USD

Здесь видно (см. малую окружность), что за анализируемый период около 2,5 месяцев цена только

один раз откорректировалась к началу предыдущего ценового импульса (к дневной базе), двигаясь внутри

ценового коридора. Но в той ситуации не каждый трейдер рискнул бы там продать, поскольку на большем ТФ цена подошла к важному недельному уровню спроса (недельной базе) и могла развернуться вверх. Поэтому, даже наоборот: многие трейдеры уже видимо искали бы там покупку, увидев на ценовом графике два хороших разворотных пинбара с «фитилями» вниз. Однако даже при наличии откатов цены, не достигших отмеченных дневных баз типа RBD, именно благодаря сформированным в этих откатах пинбарам (пусть даже не идеальным на D1) у трейдеров всё же было достаточно возможностей для открытия прибыльных сделок на продажу валюты в направлении сильного нисходящего тренда.

Теперь в качестве примера предлагаемого метода определения зон спроса (предложения) в сильном ценовом тренде более детально рассмотрим один из последних мощных ценовых импульсов, который

приведен внутри большой окружности на рис. 3. Его внутренняя структура на ТФ М30 (30-минутный) показана на рис. 4, где видно, как пинбар на D1 действительно сформировался от скрытой на таймфрейме D1 (но видной на М30) базы типа DBD. Причём, стоит обратить внимание на то, что прежде, чем достичь этой скрытой разворотной базы, откатный пинбар совершил ложный пробой классического уровня сопротивления, что для многих начинающих трейдеров, наученных открывать торговые сделки при подобных пробоях, означало бы получение торговых убытков.

Без такого пинбара далеко не каждый из трейдеров определил и идентифицировал бы на ценовом графике эту скрытую базу, а также с высокой степенью вероятности спрогнозировал бы возможный разворот цены от неё.



Рис. 4 – Дневной ценовой импульс и его внутренняя структура

Следует также заметить, что эта база была сформирована в моменты сильных эмоций и волнений огромной массы трейдеров, когда на рынке происходили большие и быстрые ценовые движения. При этом известно [5], что при таких сильных ценовых импульсах эмоции трейдеров, способные навредить их торговле – максимальны. Это подтверждает важность психологической составляющей в трейдинге. Таким образом, можно предположить, что умение трейдера определять эмоциональное настроение масс торговцев на рынке в моменты формирования скрытых баз может способствовать правильной идентификации этих баз.

Безусловно, это «проявление» скрытой базы пинбаром является обычным опаздывающим подтверждением разворота цены, увеличивающим риск и уменьшающим прибыль трейдеров. Поэтому при известном расположении базы такое подтверждение излишне. Но возможно, что для большинства не достаточно опытных трейдеров это подтверждение как раз и является тем оптимальным действием, которое находится между агрессивной торговлей без подтверждения от неявных и сомнительных баз внутри импульса – с одной стороны, и бездейственным ожидающим наблюдением за уходящими без открытых торговых сделок трендами – с другой стороны.

**Выводы.** В работе показана важность для успешной торгово-инвестиционной деятельности умения определять на ценовом графике скрытые зоны спроса/предложения (базы), расположенные внутри ценовых импульсов сильных трендов. Это позволяет открывать высоко вероятные торговые сделки в случае не достижения ценой начала указанных ценовых импульсов, что обычно и происходит при наличии сильных тенденций на рынке. Предложено проблему определения скрытых баз решать путём использования в качестве инструмента специального графического ценового формирования в виде откатного пинбара. В результате, решение обозначенной в работе проблемы увеличивает вероятность успешности заключенных на открытых рынках торговых сделок, а также способствует повышению прибыльности торгово-инвестиционной деятельности в целом.

Однако рассматриваемый вопрос требует дальнейшего исследования. Это вызвано тем, что уровень отката цены и формирования «фитиля» пинбара может оказаться не искомой базой, где расположены остаточные не закрытые торговые ордера крупных участников рынка, а совершенно случайным уровнем завершения фиксации трейдерами части полученной прибыли перед началом следующего ценового импульса. С другой стороны, этот уровень «фитиля» пинбара может быть совершенно случайным уровнем завершения отвлекающего манёвра банков и крупных учреждений для введения в заблуждение начинающих трейдеров и вовлечение их в ложное противотрендовое движение. Подобные психологические воздействия обусловлены тем, что в таких ситуациях профессиональные торговые учреждения остро нуждаются в ликвидности своих активов, а также в нара-

щивании собственных прибыльных торгово-инвестиционные позиции перед следующим трендовым импульсом. Реалии же рынка таковы, что обеспечивать эти потребности возможно в основном только за счёт огромной массы мелких рыночных торговцев.

**Список литературы:** 1. Lessons from the Pros: Уроки Онлайн Академии трейдеров. – Режим доступа : <http://lessons.tradingacademy.com>. – Дата обращения : 27 июня 2015. 2. Торговые системы (стратегии) основанные на Price action. – Режим доступа : <http://www.priceactionfx.ru>. – Дата обращения : 5 августа 2015. 3. Лубенець С. В. Аналіз часових рядів у прогнозуванні фінансових інвестицій / С. В. Лубенець // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Сер. «Економічна». – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна – 2013. – № 1068, вип. № 86. – С. 124–128. 4. Оценка уровней Спроса (Поддержки) и Предложения (Сопrotивления). – Режим доступа : <http://www.myforextrading.ru/2012/03/1.html>. – Дата обращения : 6 сентября 2015. 5. Лубенець С. В. Проблеми формування психологічних якостей фахівців у сфері фінансових інвестицій / С. В. Лубенець, О. М. Харцїй, Г. В. Аfenченко // Вісник ХДАК : зб. наук. праць / М-во культури України, ХДАК. – Харків, 2014. – Вип. 45. – С. 275–282.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lessons from the Pros: Uroki Onlajn Akademii trejderov. Web. 27 June 2015 <<http://lessons.tradingacademy.com>>. 2. Torgovye sistemy (strategii) osnovannye na Price action. Web. 5 August 2015 <<http://www.priceactionfx.ru>>. 3. Lubenec' S. V. Analiz chasovyh rjadiv u prognovuvanni finansovyh investycij. Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo universytetu imeni V. N. Karazina. Ser. "Ekonomichna". Kharkiv: HNU im. V. N. Karazina. 2013. No. 1068.86. 124–128. Print. 4. Ocenka urovnej Sprosa (Podderzhki) i Predlozhenija (Soprotivlenija). Web. 6 September 2015 <<http://www.myforextrading.ru/2012/03/1.html>>. 5. Lubenec' S. V., Harcij O. M., Afenchenko G. V. Problemy formuvannja psihologichnyh jakostej fahivciv u sferi finansovyh investycij. Visnyk HDAK: zb. nauk. prac'. M-vo kul'tury Ukraїny, HDAK. Kharkiv, 2014. Vyp. 45. 275–282. Print.

Поступила (received) 08.09.2015

**Лубенець Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента социально-культурной деятельности Харьковской государственной академии культуры, г. Харьков; тел.: (097) 361-55-09; e-mail: S.Lubenec@ukr.net.

**Lubenec Sergej Vasil'evich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv State Academy of Culture, Associate Professor at the Department of Management of Social Cultural Activities, Kharkov; tel.: (097) 361-55-09; e-mail: S.Lubenec@ukr.net.

**Павленко Евгений Петрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков; тел.: (050) 303-33-56; e-mail: evg-pavl@mail.ru.

**Pavlenko Evgenij Petrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National University of Radioelectronics, Associate Professor at the Department of the Information Control Systems, Kharkov; tel.: (050) 303-33-56; e-mail: evg-pavl@mail.ru.

**Харцїй Елена Николаевна** – кандидат психологических наук, доцент, доцент кафедры социальной психологии Харьковской государственной академии культуры, г. Харьков; тел.: (066) 372-20-13; e-mail: harley\_99@ukr.net.

**Harcij Elena Nikolaevna** – Candidate of Psychological Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv State Academy of Culture, Associate Professor at the Department of Social Psychology, Kharkov; tel.: (066) 372-20-13; e-mail: harley\_99@ukr.net.

О. М. НАЗАРЕНКО

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ СЛАБО ФОРМАЛІЗОВАНИХ ПРОЦЕСІВ З НЕВІДОМИМИ ВХОДАМИ

Розглядається проблема специфікації та ідентифікації лінійної стаціонарної моделі з невідомими входами. Моделювання невідомих входів проводиться згідно принципу мультиплікатора. Траєкторії руху введених керувань розкладаються на трендову та періодичну складові, що дозволяє розв'язати диференціальні рівняння руху в явному вигляді. Параметрична ідентифікація невідомих коефіцієнтів здійснюється методами економетрики при певних обмеженнях на елементи матриць. Апробація побудованих алгоритмів проводиться на реальних статистичних даних.

**Ключові слова:** специфікація, ідентифікація, циклічний процес, імітація, прогнозування, апробація моделі.

**Вступ.** Побудова математичних моделей динамічних процесів в техніці та економіці є актуальною і складною проблемою, ефективно розв'язання якої спряжене з певними труднощами не лише зв'язаними з можливістю застосування математичних методів, але і принципово ґносеологічного характеру [1, 2]. На відміну від таких природничих наук як фізика і механіка, технічній та економічній науці не вдається встановити фундаментальні і динамічні кількісні закономірності, які зв'язують між собою різноманітні числові показники. Складність, швидка мінливість, присутність не формалізованих і невизначених факторів, обумовлених ірраціональною поведінкою людини, – основні причини, які заважають побудові математичних моделей, що адекватно описують еволюцію технічних та економічних систем.

Дослідження технологічних та економічних процесів, які часто класифікують як слабо формалізовані, повинні, передусім, спиратись на постійний аналіз статистичних даних. Для конструювання динамічних моделей тут необхідно виробити принципи, що спираються на технічні та економічні науки і дозволяють генерувати алгебраїчні та диференціальні рівняння, які однозначно визначають еволюцію досліджуваного процесу [3, 4].

Ключовою проблемою математичного моделювання слабо формалізованих динамічних систем є ідентифікація рівнянь руху, оскільки на практиці вони не специфіковані [5, 6]. Тут невизначеними є не лише фазові координати  $\mathbf{k}$ , а й розмірність  $n$  фазового простору. Крім того, параметри динамічної моделі заздалегідь невідомі і повинні бути розроблений відповідний алгоритм параметричної ідентифікації. Проблема може ускладнюватися тим, що для фазових координат  $\mathbf{k}$  і для змінних  $\mathbf{I}$ , які подаються на вхід динамічної системи, відсутня статистична інформація. У подібних ситуаціях можна використовувати замішуючі змінні (наприклад, якщо невідомі статистичні дані по фазовим координатам, але відомі дані по їх приростам), а вхідний сигнал  $\mathbf{I}(t)$  можна моделювати за допомогою принципів мультиплікатора або акселератора [7], зв'язавши вхід  $\mathbf{I}(t)$  лінійною залежністю з деяким вектором  $\mathbf{x}(t)$  або  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  відповідно. Якщо відома статистична інформація  $\{\mathbf{x}_t\}$ ,  $t = \overline{1, N}$ , то  $\mathbf{x}$  виступає у ролі вектора керувань і за його допомогою

налаштовують динамічну модель на високі імітаційні властивості [8].

У керованих динамічних системах конструювання закону керування здійснюється за допомогою регулятора, який повинен реалізовувати принцип оберненого зв'язку [9, 10]: вектор керувань  $\mathbf{x}$  у кожний момент часу є функцією фазових координат  $\mathbf{k}$  та їх похідних  $\dot{\mathbf{k}}$ .

У реальних умовах окремі елементи динамічної системи взаємодіють між собою, причому ці зв'язки встановлюються протягом тривалого часу її функціонування. Це означає, що параметри диференціальних рівнянь руху задовольняють певним співвідношенням, заздалегідь невідомим. Тому регулятор динамічної системи може складатись з декількох регулюючих пристроїв, кожний з яких відповідає за певну змінну, що характеризує дану систему в цілому, і відносно якої є статистичні дані. На виході регулюючий пристрій повинен генерувати числову інформацію для специфікованих співвідношень між параметрами диференціальних рівнянь. Чим більше регулюючих пристроїв буде використано, тим менше стає число ступенів вільності при ідентифікації невідомих параметрів.

**Постановка задачі.** Розглянемо стаціонарну динамічну модель з невідомим входом  $\mathbf{I}(t)$  вигляду

$$\dot{\mathbf{k}}(t) + \lambda \mathbf{k}(t) = \mathbf{I}(t), \quad t \in [t_0, t_f], \quad \mathbf{k}(t_*) = \mathbf{k}_*. \quad (1)$$

Дана модель широко використовується в макроекономічних дослідженнях і описує інвестиційний розвиток макроекономічної системи [11].

Невідомий вхід  $\mathbf{I}(t)$  подамо згідно принципу мультиплікатора [7]:

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{R}\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

причому на елементи матриці  $\mathbf{R}$  накладаються обмеження-нерівності:

$$r_{ii} > 0; \quad r_{ij} < 0, \quad j \neq i, \quad 0 < r_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} < 1, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

При виконанні (3) існує обернена матриця  $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1}$  [12].

Вибір фазових координат  $\mathbf{k}$  та керувань  $\mathbf{x}$  залежить від мети дослідження та особливостей даного

процесу. Припускаємо, що специфіка статистичної інформації така, що відомі дані  $\{\mathbf{x}_t\}$ ,  $\{\mathbf{n}_t\}$ ,  $t = \overline{1, N}$ , де  $\mathbf{n}_t = \mathbf{k}_t - \mathbf{k}_{t-1}$ . Замість фазових координат  $\mathbf{k}$  будемо розглядати заміщуючі змінні  $\mathbf{y}$  і використовувати статистичні дані  $\{\mathbf{y}_t\}$ . Маємо (вектор  $\mathbf{k}_0$  заздалегідь невідомий)

$$\mathbf{k}_t = \mathbf{y}_t + \mathbf{k}_0, \mathbf{y}_t = \sum_{j=1}^t \mathbf{n}_j. \quad (4)$$

Задача полягає у специфікації фазових координат  $k_i$  і відповідних керувань  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), визначенні розмірності  $n$  фазового простору та оцінюванні невідомих коефіцієнтів моделі (1), (2). Оскільки метою дослідження є прогнозування майбутніх станів системи, то ідентифікацію невідомих параметрів  $\lambda$ ,  $\mathbf{k}_0$ ,  $\mathbf{R}$  будемо проводити через призму імітаційних та прогнозних властивостей фазових координат і керувань. Граничні значення диференціальних рівнянь (1) зручно задовольняти в момент часу, що слідує за періодом ідентифікації. Покладемо  $t_* = N + 1$ , тоді відрізок  $[1, N]$  будемо називати періодом ідентифікації, а відрізок  $[t_*, t_f]$  – періодом прогнозування. При оцінених значеннях невідомих параметрів розв'язок задачі Коші (1) дозволяє перевіряти імітаційні властивості модельних траєкторій на проміжку  $[1, t_*]$  і встановлювати прогнозні властивості на відрізку  $[t_*, t_f]$ . Довжина  $N$  періоду ідентифікації повинна бути достатньо великою, щоб на ньому стабілізувались взаємозв'язки між елементами системи. Для даного дослідження важливо, щоб довжина часових рядів задовольняла нерівність  $l \geq 55$ . Стаціонарність моделі характеризують високою якістю апроксимації, прогнозування та робастністю [5, 8]. При виконанні умови стаціонарності, оцінену на періоді ідентифікації  $[1, N]$  лінійну модель (1) можна переносити на період прогнозування  $[t_*, t_f]$  за умови  $t_f - t_* \ll N$  в силу інерційності динамічної системи [13].

**Метод розв'язання задачі.** У випадку стаціонарних слабо формалізованих процесів тенденцію розвитку динамічної системи будемо характеризувати лінійним трендом, а коливальний процес будемо описувати за допомогою розкладу в ряд Фур'є відхилень статистичних даних відносно відповідного тренду [10]. Тоді траєкторії керувань  $\mathbf{x}(t)$  знайдемо після оцінювання регресійної моделі

$$\mathbf{x}_t - \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{b}(t - \bar{t}) + \sum_{k=1}^{n-1} (\mathbf{a}_k \cos \omega_k t + \mathbf{b}_k \sin \omega_k t) + \mathbf{v}_t, \quad (5)$$

$$t = \overline{1, N}, \omega_k = 2\pi k/N,$$

де  $\omega_k$  – частота  $k$ -ї гармоніки;  $\mathbf{a}_k$ ,  $\mathbf{b}_k$  – вектори невідомих коефіцієнтів розкладу в обрізаний ряд Фур'є;  $\mathbf{v}_t$  – вектор випадкових збурень. При вказаних значеннях частот вектор середніх значень залишків дорівнює нулю ( $\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{0}$ ).

Визначення періоду  $T$  коливань даної системи і встановлення частот із спектра (5), на які налаштовані гармонічні хвилі, будемо здійснювати за допомогою регулятора, що обчислює сумарне значення  $x(t)$  керувань. Для цього складається регресійна модель

$$x_t - \bar{x} = b(t - \bar{t}) + \sum_{k=1}^{n-1} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) + v_t, \quad (6)$$

$$t = \overline{1, N}, \quad x(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t),$$

і за допомогою критерію Стьюдента [14] виділяються значущі гармоніки [10].

Процес виділення значущих гармонічних хвиль, характерних для даної динамічної системи, проводимо сумісно з визначенням періоду коливань  $T$ . Для встановлення оптимального значення  $N$  враховуємо поведінку досліджуваної системи поза періодом ідентифікації  $[1, N]$ . Для цього використовуємо відому статистичну інформацію відносно  $x$ , що передує моменту  $t_0$ . Значення  $t_0$  (початок періоду ідентифікації) нам заздалегідь невідоме. Якщо  $N$  вибрано таким, що модельна траєкторія коливань

$$u(t) = \sum_k (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (7)$$

при  $t \leq 0$  змінюється в напрямку статистичних даних  $u_t$  ( $t = 0, -1, \dots$ ), то покладемо  $N = T$ .

Якщо за допомогою екстраполяції назад, ми встановили період коливань, то тим самим визначено оптимальний період ідентифікації  $[1, N]$ . Вказана процедура дозволяє виділити  $n - 1$  значущих гармонік, що розповсюджуються у даній системі і, отже, визначена оптимальна розмірність  $n$  фазового простору. Специфікація компонент вектора керувань  $\mathbf{x}$  проводиться при заданому значенні  $n$ . При поділі множини  $\mathbf{x}$  на підмножини  $x_1, x_2, \dots, x_n$  добиваємось, щоб властиві їм гармонічні коливання налаштовувались на частоти із спектра (5).

Нехай вектор керувань  $\mathbf{x}(t)$  дорівнює

$$\mathbf{x}(t) = \bar{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{b}}(t - \bar{t}) + \sum_{k=1}^{n-1} (\hat{\mathbf{a}}_k \cos \omega_k t + \hat{\mathbf{b}}_k \sin \omega_k t). \quad (8)$$

У випадку (8) можна отримати розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) у явному вигляді. Помножимо рівняння (1) на  $e^{\lambda t}$  і проінтегруємо його від заданого значення  $t_*$  до моменту часу  $t$ :

$$\int_{t_*}^t e^{\lambda \tau} (\dot{\mathbf{k}}(\tau) + \lambda \mathbf{k}(\tau)) d\tau = \int_{t_*}^t e^{\lambda \tau} \mathbf{R} \mathbf{x}(\tau) d\tau.$$

Після деяких перетворень одержуємо

$$\mathbf{k}(t) = e^{-\lambda(t-t_*)} \mathbf{k}_* + \mathbf{R} e^{-\lambda t} \int_{t_*}^t e^{\lambda \tau} \mathbf{x}(\tau) d\tau. \quad (9)$$

У випадку (8) інтеграл в (9) дорівнює

$$\int_{t_0}^t e^{\lambda \tau} \mathbf{x}(\tau) d\tau = e^{\lambda t} \mathbf{f}(t) \Big|_{t_0}^t, \quad (10)$$

де  $\mathbf{f}(t)$  – відома вектор-функція при заданому розкладі (8) вектора  $\mathbf{x}(t)$ .

Тоді розв'язок (9) приймає вигляд

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{R}\mathbf{f}(t). \quad (11)$$

Тепер задача зводиться до оцінювання невідомих матриці  $\mathbf{R}$  і параметра  $\lambda$ . При практичних дослідженнях на елементи матриці  $\mathbf{R}$  накладаються обмеження вигляду (3). Тому ідентифікація моделі (1) спряжена з деякими труднощами.

Введемо у розгляд регулятор, який у даній роботі буде складатися з двох регулюючих пристроїв, які контролюють зміни сумарних значень  $y$  і  $f$ . Регресійні рівняння, які відповідають вказаному регулятору, наступні ( $h_t$ ,  $w_t$  – випадкові відхилення):

$$y_t - \bar{y} = \mathbf{r}'(\mathbf{f}(t) - \bar{\mathbf{f}}) + h_t, \quad t = \overline{1, N}, \quad (12)$$

$$f(t) - \bar{f} = \mathbf{q}'(\mathbf{y}_t - \bar{\mathbf{y}}) + w_t, \quad t = \overline{1, N},$$

причому на параметри моделей регулюючих пристроїв накладаються обмеження-нерівності

$$\lambda > 0, \quad \mathbf{q} > \mathbf{0}, \quad \mathbf{r} > \mathbf{0}. \quad (13)$$

Якщо отримані МНК-оцінки  $\hat{\lambda}$ ,  $\hat{\mathbf{q}}$  і  $\hat{\mathbf{r}}$ , то наступним кроком є оцінювання матриці  $\mathbf{R}$ , що фігурує в (11). Складаємо регресійну модель

$$\mathbf{y}_t - \mathbf{y} = \mathbf{R}(\mathbf{f}(t) - \bar{\mathbf{f}}) + \mathbf{h}_t, \quad t = \overline{1, N}, \quad (14)$$

де вектор-функція  $\mathbf{f}(t)$  визначається з (10) за умови, що вектор керувань  $\mathbf{x}(t)$  ідентифікований згідно (8).

Оцінювання регресійної моделі (14) необхідно проводити при обмеженнях на елементи матриці  $\mathbf{R}$ , що впливають з (3) і (12), (13):

$$\sum_{i=1}^n r_{ij} = \hat{r}_j; \quad \sum_{i=1}^n \hat{q}_i r_{ij} = 1; \quad r_{ii} > 0; \quad r_{ij} < 0, \quad j \neq i, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (15)$$

**Практична реалізація алгоритму.** Апробація побудованої моделі проводилася на базі статистичних даних макроекономічного розвитку Франції за 1956–2011 рр. [15]. У якості координат фазового вектора у вибиралися прирости основних фондів (статистичні дані – Gross fixed capital formation), а координатами вектора керувань  $\mathbf{x}$  – випуски секторів (статистичні дані – Value added). Чисельний експеримент встановив оптимальне значення об'єму вибірки  $N = 50$ , при цьому 1960–2009 рр. – період ідентифікації, 2010–2011 рр. – період прогнозування. Встановлено, що при рівні значущості  $\alpha=0,005$  і числу ступенів вільності  $l=N-2n$  економіці Франції властиві чотири значущі гармоніки ( $k=1, 2, 3, 6$ ): хвиля Кондратьєва ( $k=1$ ), хвиля Кузнеця ( $k=3$ ), хвиля Жугляра ( $k=6$ ) [16], а також проявляє себе хвиля з періодом, що дорівнює половині періоду хвилі Кондратьєва ( $k=2$ ). Отже, макроекономічну систему Франції необхідно ділити на п'ять секторів і налаштування секторів-кандидатів на вказані гармонічні коливання привело до такого оптимального поділу економіки Франції на сектори: промисловість та сільське господарство (Industry; Agriculture); будівництво та транспорт (Construction; Transport); фінансовий сектор і нерухомість (Finance; Real estate); комунікації та наука (Communication; Science); сфера послуг (Service Industries).

Оцінювання моделі (8) дало наступні значення коефіцієнтів детермінації  $R^2$  трендів, навколо яких відбуваються коливання (табл. 1).

Таблиця 1 – Коефіцієнти детермінації трендів

№ сектора	1	2	3	4	5	$\Sigma$
$R^2$	0,5231	0,8548	0,8993	0,8220	0,8756	0,8021

Аналіз табл. 1 показує, що коливання випусків навколо відповідних трендів є відчутними. Частки

дисперсій гармонік у загальній дисперсії коливань наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти детермінації гармонік

№ сектора	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=6$	$\Sigma$
1	0,9523	0,0179	0,0205	0,0020	0,9926
2	0,6319	0,2883	0,0486	0,0072	0,9760
3	0,7604	0,1792	0,0385	0,0035	0,9815
4	0,8661	0,0911	0,0220	0,0045	0,9836
5	0,8174	0,1632	0,0061	0,0017	0,9882
$\Sigma$	0,8082	0,1596	0,0186	0,0046	0,9909

Як бачимо, хвиля Кондратьєва вносить основний вклад в коливання всіх секторів. Друга хвиля особливо проявляє себе у третьому і п'ятому секторах, а хвиля Кузнеця – у п'ятому. Вклад хвилі Жугляра є меншим у порівнянні з іншими хвилями, але він є значущим у функціях коливань випусків.

Сумарний вклад гармонік в дисперсію коливань становить від 97,60% (2-й сектор) до 99,26% (1-й сектор). Тому регресійні моделі коливань мають якісні апроксимаційні властивості і можна очікувати значущого вкладу в дисперсії випусків. Якість модельних траєкторій випусків оцінюється в табл. 3.



Таблиця 3 – Якість модельних траєкторій випусків

№ сектора	1	2	3	4	5	$\Sigma$
$R^2$	0,9992	0,9991	0,9989	0,9989	0,9995	0,9992

На рис.1 приведені графіки модельних кривих валових випусків економіки в цілому (ВВП) та їх коливань. Тут точками зображені статистичні дані, а суцільною лінією – траєкторії руху (всі дані безрозмірні шляхом ділення розрахункових значень на

відповідне значення у початковому 1960 р.). Порівняння прогностичних значень з реальними даними (дві останні точки, що відповідають 2010 і 2011 рр.) свідчить про високоточні прогностні властивості моделі (8).

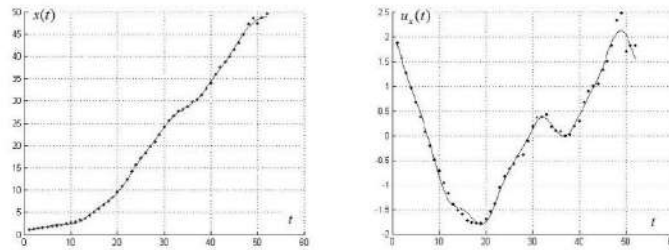


Рис. 1 – Модельні криві ВВП та відповідних коливань за 1960–2011 рр.

Наступним кроком є оцінювання регресійних рівнянь (12), які відповідають першому і другому регулюючим пристроям. МНК-оцінки невідомих коефіцієнтів дорівнюють:

$$\begin{aligned} \hat{\lambda} &= 0,0177, \hat{r}_1 = 0,2083, \hat{r}_2 = 0,2281, \hat{r}_3 = 0,3390, \\ \hat{r}_4 &= 0,3552, \hat{r}_5 = 0,2508, \hat{q}_1 = 4,8017, \hat{q}_2 = 4,3843, \\ \hat{q}_3 &= 2,9494, \hat{q}_4 = 2,8151, \hat{q}_5 = 3,9867. \end{aligned}$$

При заданому  $\hat{\lambda}$  обчислюємо інтеграли, що фігурують в (10), і знаходимо невідому вектор-функцію  $\mathbf{f}(t)$ . Далі оцінюємо модель (14) при обмеженнях (15) і додаткових обмеженнях на діагональні елементи матриці  $\mathbf{R}$  (впливають з фізичної сутності задачі):

$$0,3 + 0,6 \hat{r}_j < r_{ii} < 0,6 + 0,3 \hat{r}_j,$$

У табл. 4 приведені МНК-оцінки елементів  $\mathbf{R}$ .

Таблиця 4 – МНК-оцінки елементів матриці  $\mathbf{R}$

0,4409	-0,0032	-0,0142	-0,0092	-0,0169
-0,1298	0,5638	-0,0138	-0,1986	-0,1183
-0,0035	-0,0808	0,5428	-0,1144	-0,0967
-0,0177	-0,0414	-0,1688	0,6819	-0,0971
-0,0817	-0,2103	-0,0069	-0,0044	0,5798

Розроблений алгоритм дозволяє оцінити невідомі значення основних фондів (ОФ) у початковий момент часу (4). Ці значення дозволяють відновити невідомі

статистичні дані по ОФ. Крім того, згідно моделі (2) можна відновлювати статистичні дані по інвестиціям. Траєкторії ОФ та інвестицій наведені на рис. 2.

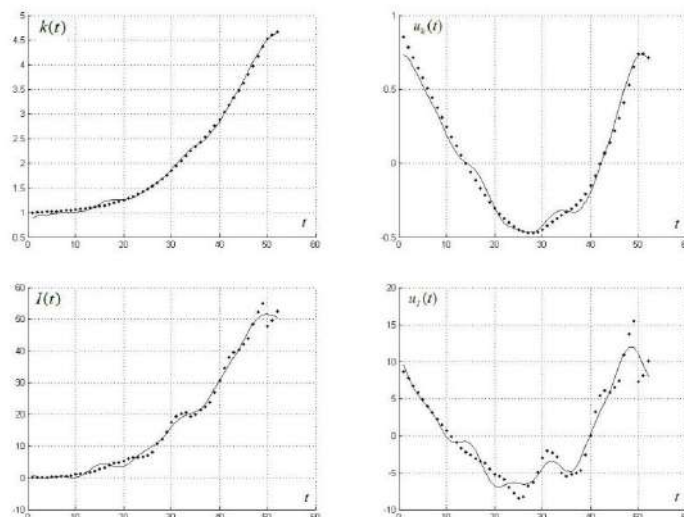


Рис. 2 – Модельні траєкторії ОФ, інвестицій та відповідних коливань

На рис. 2 точками зображені статистичні дані, а суцільною лінією траєкторії руху (всі дані безрозмірні шляхом ділення на значення у початковому 1960 р.).

Аналіз імітаційних та прогнозних властивостей модельних кривих вказує на їх адекватність статистичним даним.

**Висновки.** У даній роботі запропоновано алгоритм параметричної ідентифікації стаціонарної динамічної моделі з невідомим входом. Траєкторії руху керувань моделюються за допомогою розкладання на трендову та періодичну складові, що дозволяє розв'язати диференціальні рівняння руху в явному вигляді. Апробація побудованих алгоритмів проводилась на статистичних даних реальної макроекономічної динаміки. Виявлені значущі гармонічні хвилі, характерні для даної системи. На параметри моделі накладалися обмеження-нерівності, що впливають з фізичної сутності задачі. Це дозволило отримати криві фазових координат, керувань і невідомого входу, які мають високоякісні імітаційні та прогнозні властивості, що свідчать про адекватність запропонованої моделі статистичним даним.

**Список літератури:** 1. Глушков В. М. Моделирование развивающихся систем / В. М. Глушков, В. В. Иванов, В. М. Яненко // М. : Наука, 1983. – 350 с. 2. Aubin J. P. Dynamic Economic Theory // J. P. Aubin // Springer-Verlag, 1997. – 510 p. 3. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. / В. М. Кунцевич // К. : Наук. думка, 2006. – 264 с. 4. Альбрехт Э. Г. Методика построения и идентификации математических моделей макроэкономических процессов / Э. Г. Альбрехт // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2002. – Т. 5. – С. 54–86. 5. Greene W. H. Econometric Analysis // W. H. Greene // 5th ed. – N.Y. : Pearson Educ. Int, 2003. – 1056 p. 6. Ramsay J. O. Parameter Estimation for Differential Equations: A Generalized Smoothing Approach // J. O. Ramsay, G. Hooker, D. Campbell, J. Cao // J. of the Royal Stat. Society. Series B. – 2007. – Part 5, № 69. – P. 741–796. 7. Колемаев В. А. Экономико-математическое моделирование. Моделирование макроэкономических процессов и систем / В. А. Колемаев // М. : Юнити-Дана, 2005. – 295 с. 8. Назаренко А. М. Идентификация и оптимизация слабо формализованных процессов в классе стационарных LQ моделей / А. М. Назаренко, Д. В. Фильченко // Кибернетика и вычислительная техника. – Киев. – 2009. – Вып. 158. – С. 81–99. 9. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков // Изд. 4-е, исправл. – М. : Наука, 2004. – 591 с. 10. Назаренко О. М. Идентификация та прогнозування стаціонарних слабо формалізованих процесів з ефектом запізнення в n-вимірному просторі. / О. М. Назаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 37 (1010). – С. 90–104.

11. Solow R. M. A Contribution to the Theory of Economic Growth // R. M. Solow // Quarterly Journal of Economics. – 1956. – № 70. – P. 65–94. 12. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер // 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1966. – 576 с. 13. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян // М. : ЮНИТИ, 1998. – 1000 с. 14. Назаренко О. М. Основи економіки / О. М. Назаренко // Вид. 2-ге, перероб.: Підручник – Київ: Центр навчальної літератури, 2005. – 392 с. 15. INSEE – Режим доступа : <http://www.bdm.insee.fr/bdm2/index.action> – Дата звернення : 20 квітня 2015. 16. Korotayev A. V. Spectral Analysis of World GDP Dynamics: Kondratieff Waves, Kuznets Swings, Juglar and Kitchin Cycles in Global Economic Development, and the 2008–2009 Economic Crisis // A. V. Korotayev, S. V. Tsirel // Structure and Dynamics. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 3–57.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hlushkov V. M., Ivanov V. V., Yanenko V. M. Modelirovanie razvivayuschihya sistem // M. : Nauka, 1983. – 350. Print. 2. Aubin, J. P. Dynamic Economic Theory // Springer-Verlag, 1997. – 510. Print. 3. Kuntsevich V. M. Upravlenie v usloviyah neopredelennosti: garantirovannyye rezultaty v zadachah upravleniya i identifikatsii. – K. : Nauk. dumka. – 2006. – 264. Print. 4. Albreht E. G. Metodika postroyeniya i identifikatsii matematicheskikh modeley makroekonomicheskikh protsessov // Elektromniy zhurnal «Issledovano v Rossii». – 2002. – T. 5. – 54–86. Print. 5. Greene W. H. Econometric Analysis // 5th ed. – N.Y.: Pearson Educ. Int. – 2003. – 1056. Print. 6. Ramsay J. O., Hooker G., Campbell D., Cao J. Parameter Estimation for Differential Equations: A Generalized Smoothing Approach // J. of the Royal Stat. Society. Series B. – 2007. – Part 5, №. 69. – 741–796. Print. 7. Kolemaev V. A. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie. Modelirovanie makroekonomicheskikh protsessov i sistem // M: Yuniti-Dana, 2005. – 295. Print. 8. Nazarenko A. M., Filchenko D. V. Identifikatsiya i optimizatsiya slabo formalizovannykh protsessov v klasse stacionarnykh LQ modeley // Kibernetika i vychislitel'naya tehnika. – Kiev, 2009. – Vyp. 158. – 81–99. Print. 9. Babakov I. M. Teoriya kolebaniy // Izd. 4-e, ispravl. – M.: Nauka, 2004. – 591. Print. 10. Nazarenko O. M. Identifikatsiya ta prognozuvannya stacionarnykh slabo formalizovanykh protsessiv z efektom zapiznennya v n-vimirnomu prostori. // Visnik NTU«HPI». Seriya: Matematichne modelyuvannya v tehniitsi ta tehnologiyah. – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – № 37 (1010). – 90–104. Print. 11. Solow R. M. A Contribution to the Theory of Economic Growth // Quarterly Journal of Economics. – 1956. – № 70. – 65–94. Print. 12. Gantmaher F. R. Teoriya matrits // 2-e izd., dop. – M. : Nauka. – 1966. – 576. Print. 13. Ayvazyan S. A., Mhitarayan V. S. Prikladnaya statistika i osnovniy ekonometriki // M.: Yuniti. – 1998. – 1000. Print. 14. Nazarenko O. M. Osnovi ekonometriki // Vid. 2-ge, pererob.: Pidruchnik – Kiyv: Tsentri navchalnoyi literaturi. – 2005. – 392. Print. 15. INSEE – Rezhym dostupa : <http://www.bdm.insee.fr/bdm2/index.action> – Data zvernennya : 20 kvitnya 2015. 16. Korotayev A. V., Tsirel S. V. Spectral Analysis of World GDP Dynamics: Kondratieff Waves, Kuznets Swings, Juglar and Kitchin Cycles in Global Economic Development, and the 2008–2009 Economic Crisis // Structure and Dynamics. – 2010. – Vol. 4, № 1. – 3–57. Print.

Надійшла (received) 29.06.2015

**Назаренко Олександр Максимович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри «Моделювання складних систем»; тел.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

**Назаренко Александр Максимович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Сумской государственной университет, доцент кафедры «Моделирование сложных систем»; тел.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

**Nazarenko Oleksandr Maksymovych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Sumy state university, Associate Professor at the Department of Modeling of Complex Systems; tel.: (066) 921-55-34; e-mail: aleksandr-nazarenko54@mail.ru.

**M. I. BEZMENOV, Y. O. POTAPENKO, K. O. DVORNIK**

## A UNITY 3D ENGINE PLUGIN FOR CREATING STATIC ECOSYSTEM IN GAME APPLICATIONS

Here we report on the researches and development of the static ecosystem plugin to Unity 3D game development platform, also the creation of neural network has been described. It allows for the designer-driven automatic generation of computer game assets based on the two vastly different approaches: procedural and artificial-neural-network-based; with user-defined object to be cloned, area to be populated and placement rules. Both methods have been applied to the problem of photorealistic distribution of stones on the hillside (including demonstration of the common placements mistakes). All the approaches were then evaluated by the panel of the computer gamers. Opinion of some participants of the experiment with the corresponding results were summarized.

**Keywords:** Unity 3D, game environment, artificial neural networks, procedural generation, computer graphics, 3D modeling, landscape.

**Introduction.** Game industry exists a lot of years, but its popularity is only growing. One of the most important aspects of the modern game development is creating an in-game environment. Game environment it is something like field, forest or town and all the objects around you in this location (if compare it to the real world). For location looks like real, it is necessary to put environment objects in similar positions, and mount as on the existing location. So, in-game environment consists of a set of a 3D objects placed in certain points of space according to some objective or subjective rules. There are two major approaches to the in-game environment development: procedural and manual [1]. The former is a fully automated process that distributes objects in space according to the well defined rules. The main advantage of this method is practically instantaneous environment generation, e.g. millions of objects could be scattered for less than a second using modern computer hardware. However procedural approach is typically considered to be “unattractive” to the prospective audience of the game due to the relative low variance of the object distributions this methods offers. It is essentially limited by the amount of rules programmers could implement in software on feasible timescales. Consequently, level designers spend considerable amount of time to generate reasonably vibrant in-game environment using trial and error approach on the number of parameters the procedural generator has. The manual approach is obviously even more time consuming since every object (most likely out of thousands) should be placed, rotated and scaled by hand. However as this method fully relies on the artistic impression and skills of the level designer, it might lead to creation of truly unique in-game environments. So the most optimal approach is to use procedural and manual methods together: automatically generate an in-game environment and then refine it manually until it fits the quality criterion of the given computer game project. Here we demonstrate how the artificial neural networks [2] could be used to allow level designers to create their own, unique, set of rules for procedural generators. Such rules then could be trained even further by other designers allowing for vibrant and unique in-game environments to be generated automatically.

**The aim** of this work is to develop a plugin for Unity 3D engine that uses artificial neural networks to combine the procedural and manual methods of in-game environment creation.

**Problem definition.** The plugin should allow one to access the landscape system of the Unity 3D engine. So any particular environmental object could be selected to be instanced and distributed in space according to the custom-defined rules with a set of parameters exposed to the level designer. To account for domain-like structure of the real world the plugin should also allow for the distribution area to be user-defined.

The distribution rules set for the given object and (or) its existing placement we would call an ecosystem. For the reference we would rely on the ecosystem created using VUE eON software, which is a state-of-the-art tool widely used in film and CG industries to create and visualize large-scale artificial worlds. We would restrict its procedural generator parameters to the certain ranges of elevation, tilting, rotation and scaling of the objects.

Finally, we empirically chose a particular type of artificial neural network and then estimate the required amount of neurons and synapses. The amount of inputs of the network is kept the same to what we used in Vue eON software, with the input parameters normalized to the respective ranges [2]. The tilt and elevation of the object is estimated from the topology of the landscape using the 8-neighbors method [3]. We employ an open-source NeuralDotNet library that allows one to create, train and apply deep artificial neural networks with backpropagation and dynamically adjustable amount of neurons.

**Literature review.** Any procedural generation of in-game assets includes natural and artificial objects as emphasized in bestselling Bill Fleming’s “3D Photorealism Toolkit”. He intentionally splits his book into two parts: creation of city and natural environments; each with vastly different approaches and specific rules that significantly contribute to the realism of the result [4]. Let us consider procedural generation of city landscape. The design of artificial objects typically obeys high degree of symmetry. For instance cities typically expose straight, rectangular and systematically placed objects with minimum of entropy. However, it is not necessarily mean that it is vanishing, e.g. buildings have different heights and there are certain amounts of waste and traffic on the streets. Therefore, procedural generation of city landscapes should combine both chaos-driven and systematic rules. An example of automatically created city environment is shown in Fig. 1.



Fig. 1 – A city landscape generated by the procedural approach

To create a photorealistic virtual city with VUE 3D one needs to use a set of different types of buildings. In the VUE ecosystem this could be finely adjusted by pressing the Add Layers, adding objects to populate. In contrast, the rotations should be restricted to multiples of  $\pi/2$ . Such restrictions on the parameters are not supported by the ecosystem, but should be set manually prior to instancing. The random shift of the object should be confined to some small in-plane values as buildings are relatively aligned with respect to each other and, obviously, cannot be elevated above the ground surface. The local surface normal should not be used in procedural generation of virtual cities as buildings are typically made strictly vertical. This set of rules could be extrapolated to any artificial objects, e.g. western gravestones, belts, power grids, etc. A vastly different set of rules should be applied to natural environments. In case the chaos dominates over uniformity. Moreover, the natural objects are typically placed along the local normal of the ground surface and there is no need to constrain the rotation. Anyway some empirical placement rules could still be identified. For instance, there is always more vegetation around the large stones, since they are able to keep more moisture; small stones are typically seen in steppes where they are largely affected by the weathering. It is virtually impossible to account for all such rules, but over the years game designers identified the most important of them that lead to the satisfactory level of photorealism. The population of chaotically (without any particular rules applied) placed stones is shown in Fig. 2.



Fig. 2 – A population of stones generated by the procedural approach

Visually the given environment is rather unrealistic. However if a simple rule of proportional to the object size distribution is applied the photorealism of the environment subjectively increases multifold as shown in Fig.3. This particular method relies on golden ratio principle, i.e. the so-called ‘rule of five’. In particular it postulates that the ratio between the nearest neighbor objects in parameter space should be  $1/5$ , e.g. the amount of middle-size stones should be 5 times larger than the large ones. In the reported ecosystem this method is provided by the ‘Make Nice’ function that provides photorealistic distribution of the given objects by the 3-pass instancing, each with corresponding downscaling of the objects and increasing its amount by a factor of 5. The same technique works equally well for vegetation.



Fig. 3 – Photorealistic distribution of the stones

**The proposed solution.** In the given work the artificial neural network is used as black box that maps object distribution rules developed by the level designer to the input parameters space. Hereafter we rely on the backpropagation method to train the artificial neural network [5]. A supervisor is then creates a training set with the aim to place the objects in the certain way. Let us assume that one wants to distribute cubes, so that their size increase with the altitude. If the linear dependence is sufficient, then the training set is simply a set of two cubes: one small and one large cube at low and high altitudes, respectively. The input parameters should include altitude of the ground surface at the object site and the corresponding 8 nearest-neighbour heights to account for the rules related to the direction of the local normal to the surface. There should be at least 6 outputs of the artificial neural networks to account for 3D scaling and rotation of the given object. The schematic representation of the described artificial neural network is shown in Fig. 4.

The  $h_i$  is the altitude of the neighbor vertex of the ground surface and  $i = 1, 2..8$ . ( $sX, sY, sZ$ ) and ( $rX, rY, rZ$ ) are the scaling and rotation vectors, respectively. The inputs of the network are normalized independently using the corresponding minimax values across the whole training set.



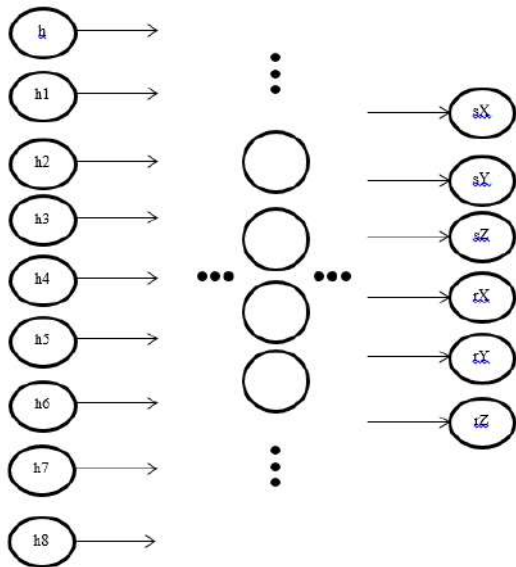


Fig. 4 – Schematic representation of the artificial neural network used to distribute the objects with linear scaling of their size vs altitude

**The routine.** At first, one needs to put our plugin to the ‘Editor’ directory of the given game project. Then the plugin should be activated from within the Unity 3D Editor by invoking the ‘Terrain->Ecosystem’ menu. In the corresponding window the user should specify the object (by sending it to the ‘prefab control’) and then the area it should be distributed to. Multiple objects could be cloned at once. In addition, there is a possibility to adjust the parameters of the ecosystem: rotation, scale and shift ranges, tilt rules with respect to the global and local normals of the ground surface. Once changes are made the instancing could be performed immediately. To train the artificial neural network, one can choose an arbitrary number of (manually distributed) objects in the scene and proceed. Finally the existing population of the objects could be selected and then re-distributed using different artificial neural network.

**Implementation of the artificial neural network.**

If the given multi-layer artificial neural network relies on linear activation functions, then due to the associativity of the matrix product it could always be reduced to the single layer topology. At the same time if the nonlinear activation function is used then it could be demonstrated that the two-layer network topology is sufficient to construct a universal function approximator [5]. Since we rely on the NeuralDotNet library that only supports nonlinear sigmoidal activation function, then the problem of the particular choice of network topology is, thereby, trivial. So we would rely on the two-layer artificial neural network with backpropagation training routine. At the same time the amount of neurons to be used should be identified using heuristic methods [5]. We would start with 18 (the value is selected randomly) neurons per each hidden layer of the network. To estimate the validity of this approximation we would calculate the variance of the outputs of the network for the given training set, i.e. the training error:

$$H = \frac{1}{2} \sum_{\tau \in V_{out}} (Z(\tau) - Z^*(\tau))^2, \quad (1)$$

where  $Z^*(\tau)$  – is the expected output value of the network,  $\tau$  – input signal [5]. To avoid the overtraining effect that leads to suppression of the generalization properties of the network the vanishing values of the training error should be avoided. This could be achieved by adjusting the amount of neurons per layer and (or) by restricting the amount of training cycles. At first let us limit this value to 5000 and then investigate the relation between the training error and the amount of neurons per layer.

The training set consists of 50 objects that are randomly scaled and placed along the local normal of the ground surface. By doing so we would make that all inputs and outputs of the network are active. The dependence of the training error on the amount of neurons per layer is shown in Fig. 5.

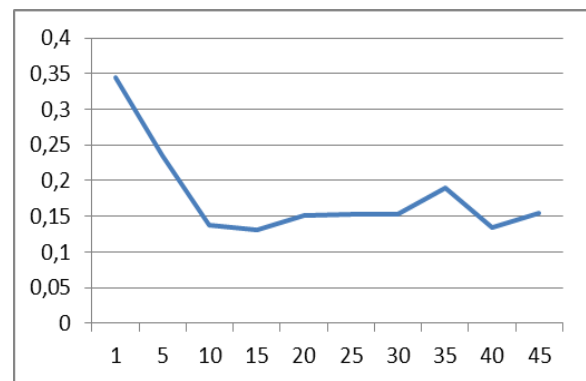


Fig. 5 – Training error vs the amount of neurons per hidden layer

The data clearly shows that the optimal (minimal) value of the training error corresponds to 15 neurons per layer. Beyond this value the training time increases significantly, while the error remains virtually constant. So by fixing the amount of neurons to the optimal value, we investigate the relation between the error and the amount of training cycles. We should also take into account the dependence of the time required to complete the training on the amount of cycles. For instance, 100 and 20000 training cycles require 5 s and 180 s, respectively. The result of this investigation is shown in Fig. 6.

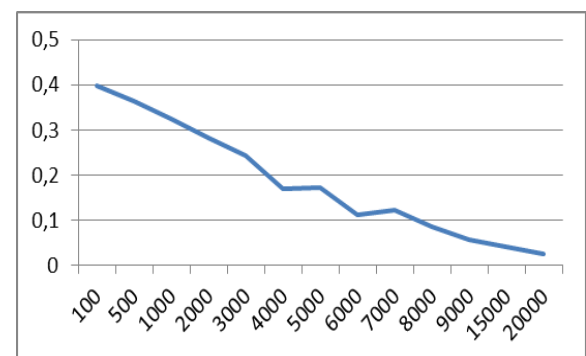


Fig. 6 – The training errors vs the amount of training cycles in case of network of 15 neurons per hidden layer

As it could be seen on the graph, the dependence is linear. So we can easily find the required amount of training cycles for the desired value of the error. The final part of the present study focuses on identifying the subjective criteria of the distribution vibrance produced by the artificial neural network approach as compared to the procedural generation.

For this purpose we create a population of objects that are placed in space using the following equations:

$$SX' = SX * R(o), \tag{2}$$

$$rX = R(o), \quad o \in (-360, 360),$$

where  $o$  – the tilt angle. Then we train the artificial neural network accordingly (Fig. 7 – 9). In this example, we wanted to create rocks that fall or are on the slope of a mountain. As the stones were used primitive Box, which is embedded in Unity 3D.

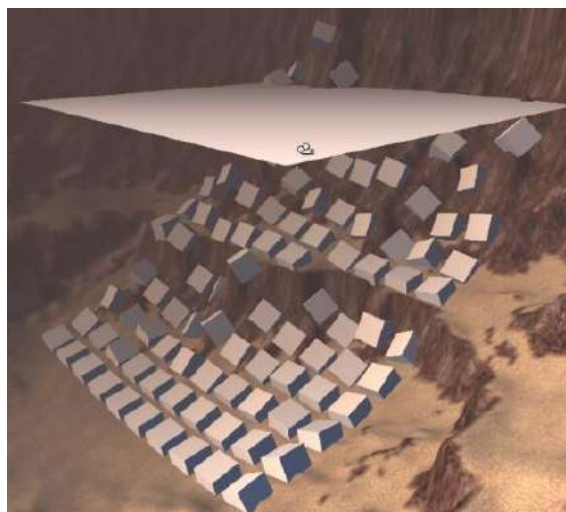


Fig. 7 – Procedurally generated population

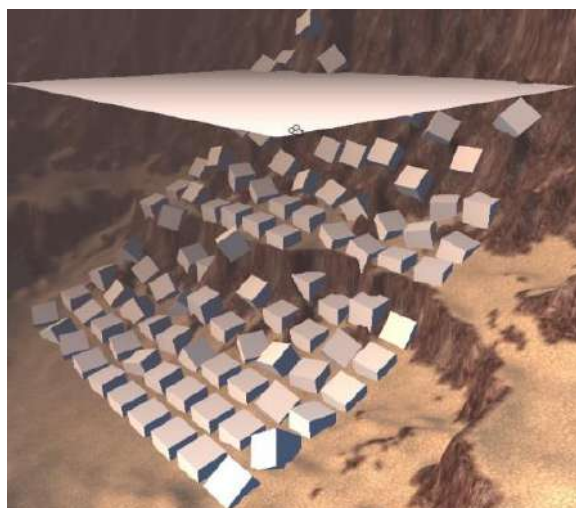


Fig. 8 – Neural network with generation error 0,02486

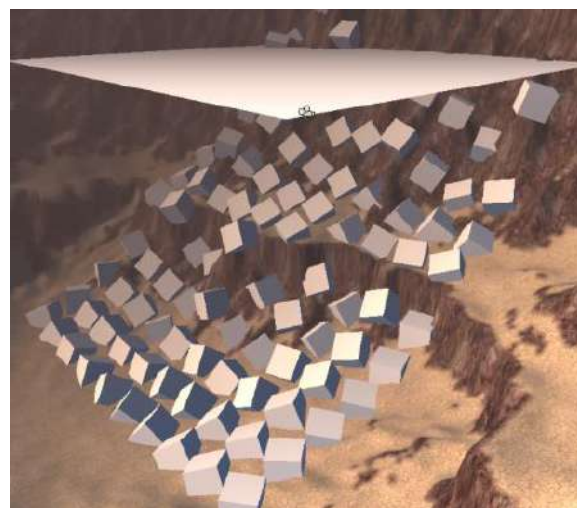


Fig. 9 – Neural network with generation error 0,336326

Fig. 7 shows procedurally generated population, it is clear that not all primitives scattered, the last row are almost not expanded, and has not changed its position. This result does not seem realistic for this task [6]. On the Fig. 8 neural network generates better spread "stones" on

the slope, but the some objects again, almost did not change their angles. Neural network generation with value generation error 0.336326 (Fig. 9) is the best results.

Then we perform a blind experiment (table 1).

Table 1 – The subjective preferences of the experts with respect to the given distribution of the objects

Expert	Generate types of creating game levels		
	Procedural	Neural networks 0,02	Neural networks 0,33
Iliya (Doctrina)			+
Denis (Program Ace)			
Helen (Program Ace)			+
Denis (Doctrina)		+	+
Pavel (CFT)			+
Olexandr (Doctrina)	+		
Mykola (GU, SE)			+
Andriy (BSK Games)			+
Viktor (ideus)			+
Evgeniy (Plaiko)			+
Artur (Plaiko)			+
Roman (Doctrina)			+
Katerina (Doctrina)			+

To assess the obtained results we formed a group of experts consisting of prospective computer gamers and game designers. Experts chose the most visually attractive distribution of the objects (table 1).

Denis Director of Cross platform Development Department at Program-Ace, explained his choice, the generation with error 0.336326 looks like spread and falling rocks. Andrew level designer and CEO of BSK Games, about generation said that from the point of level design view the best is neural networks generation 0,336326, but if the objects would be randomly scattered with bigger value of parameter, would be even better. According to the table we can say that almost all respondents declared by the neural network generation with the value of 0.336326 errors. The procedural and neural network generating have similar results, but the most interesting landscapes created through neural networks generation with the biggest mistake.

**Conclusions.** We report on the development of an artificial-neural-network-based ecosystem to distribute objects on the virtual, in-game landscapes created in Unity3d editor. In contrast to rather limited procedural generation, our approach allows one to program any custom distribution rules in natural and intuitive ways with fine control over the entropy, e.g. ranging from rather strict to practically random placement of the objects.

**Bezmenov Mykola Ivanovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Systems Analysis and Control; tel.: (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kharkov.ua.

**Безменов Микола Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу і управління; тел.: (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kharkov.ua.

**Potapenko Yuliia Olexandrivna** –National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student. tel: 063-244-64-33; e-mail: yulya.potapenko@gmail.com.

**Потапенко Юлія Олександрівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка; тел.: 063-244-64-33; e-mail: yulya.potapenko@gmail.com.

**Dvornik Kostiantyn Olexandrovich** – senior game developer, BSK Games; tel.: 093-68-68-195; e-mail: kostiantyn.dvornik@gmail.com.

**Дворник Константин Александрович** – сеньйор розробник ігор, BSK Games; тел.: 093-68-68-195; e-mail: kostiantyn.dvornik@gmail.com.

**Bibliography:** 1. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика / Ф. Уоссермен. – М. : Мир, 1992. – 184 с. 2. Вороновский В. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / В. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков : Основа, 1997. – 112 с. 3. Заенцев И. В. Нейронные сети: основные модели. Учебное пособие по курсу «Нейронные сети» для студентов 5 курса магистратуры кафедры электроники физического факультета Воронежского Государственного университета / И. В. Заенцев. – Воронеж, 1999. – 76 с. – Режим доступа : <http://neuroschool.narod.ru/books/zaencev.html>. – Дата обращения : 20 января 2015. 4. Флеминг Б. Фотореализм. Профессиональные приемы работы / Билл Флеминг. / М. : ДМК, 2000. – 384 с. 5. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс / Саймон Хайкин. – М. : Вильямс, 2006. – 1103 с. 6. Rouse R. Game Design: theory & practice / Richard Rouse. – Plano : Wordware Publishing, 2005. – 698 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Wasserman, Ph. *Nejrokomp'juternaja tehnika. Teorija i praktika*. Moscow: Mir, 1992. Print. 2. Voronovskij, V. K., et al. *Geneticheskie algoritmy, iskusstvennyye nejronnye seti i problemy virtual'noj real'nosti*. Kharkov: Osnjva, 1997. Print. 3. Zaencev, I. V. *Nejronnye seti: osnovnye modeli. Uchebnoe posobie po kursu «Nejronnye seti» dlja studentov 5 kursa magistratury kafedry jelektroniki fizicheskogo fakul'teta Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*. Voronezh, 1999. 76 p. Web. 20 January 2015 <<http://neuroschool.narod.ru/books/zaencev.html>>. 4. Fleming, B. *Fotorealizm. Professional'nye prijomny raboty*. Moscow: DMK, 2000. Print. 5. Haykin, S. *Nejronnye seti: Polnyj kurs*. Moscow: Vil'jams, 2006. Print. 6. Rouse, Richard. *Game Design: theory & practice*. Plano: Wordware Publishing, 2005. Print.

Received 05.02.2015

**А. В. ПРОХОРОВ, В. П. ПРОХОРОВ, А. О. МАТЮШКО**

## **ОБЛАЧНАЯ ПЛАТФОРМА РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Предлагается облачная платформа в рамках моделей PaaS и SaaS, которая обеспечивает поддержку всех этапов по разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений, их адаптацию для решения прикладных задач в любых предметных областях, хранение баз знаний и данных в облачных датацентрах, предоставление доступа к интеллектуальным системам как к сервисам удаленно через веб-интерфейс. Рассмотрены сценарии использования, решаемые задачи. Представлена структура платформы разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы, системы поддержки принятия решений, облачная платформа, интегрированная среда разработки, онтологии.

**Введение.** Увеличение объема информации, усложнение задач управления и анализа, необходимость учета большого числа трудноформализуемых и взаимосвязанных факторов обуславливают необходимость использования современных интеллектуальных информационных технологий в процессе принятия решений во всех сферах человеческой деятельности. Однако, несмотря на значительные достижения в области информационных технологий и искусственного интеллекта, о широком использовании интеллектуальных систем в настоящее время говорить преждевременно.

Среди основных причин, по которым интеллектуальные системы не получили должного широкого практического применения, следует выделить следующие:

- высокая стоимость, как инструментальных средств разработки интеллектуальных систем, так и самих приложений;
- сложность в проведении формализации знаний в привычных терминах, что требует привлечения для этой задачи когнитологов или инженеров по знаниям;
- специалисты или эксперты в той или иной предметной области неохотно делятся своими знаниями;
- недостаточность в семантическом и прагматическом описании базы знаний, что усложняет как создание интеллектуальной системы, так и дальнейшую интерпретацию полученных решений для той или иной предметной области;
- сложность в построении интуитивно-понятного интерфейса для представления результатов рассуждений для пользователей в естественно-языковой форме или с привлечением средств когнитивной графики;
- узконаправленность известных приложений экспертных систем с ограничением или отсутствием возможности расширения базы знаний;
- для получения полезного эффекта от применения необходимо осуществлять непрерывное сопровождение интеллектуальных систем, что в условиях названных выше причин представляется трудоемким процессом.

Поэтому реальных приложений интеллектуальных систем сегодня незначительное количество, проекты эти уникальны, в основном разрабатываются и применяются в интересах крупных организаций и яв-

ляются закрытыми для остальной массы потенциальных пользователей.

Исходя из вышеизложенных проблем, которые возникают при использовании и сопровождении интеллектуальных систем возникает задача разработки общедоступной, удобной в использовании платформы для разработки и использования экспертных систем.

Сегодня активно развивается технология облачных вычислений (cloud computing), основная идея которой заключается в предоставлении коллективного доступа к единому общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов. Соответственно, эту технологию целесообразно применить для создания платформы разработки интеллектуальных систем и их популяризации, путем обеспечения к ним свободного доступа для всех желающих.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Традиционный подход к разработке интеллектуальных систем состоит в использовании специализированных инструментальных сред. Среди таких следует отметить G2 [1], Prolog [2], CLIPS [3], Jess [4] (на базе Eclipse – интегрированной среды разработки для платформы Java) и др. Они позволяют настраивать программные средства на особенности предметных областей, предоставляют возможность программировать на встроенных языках и осуществлять эффективный экспорт/импорт данных с другими инструментальными средствами.

На базе инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, поддерживающего все этапы создания прикладных интегрированных экспертных систем, разработана веб-ориентированная версия, которая предоставляет возможности организации веб-ориентированных сеансов интервьюирования экспертов, создания веб-ориентированного пользовательского интерфейса, настройки веб-сервера, управление пользователями и развертывание финального прототипа системы [5].

Среди сред для разработки интеллектуальных систем на основе онтологий следует отметить редактор онтологических баз знаний Protégé [6]. Protégé имеет открытую архитектуру, позволяющую расширять его функциональность на основе подключаемых модулей plug-ins. Есть подключаемые модули решателей, обеспечивающих логический вывод на онтологиях, модуль, связывающий Protégé с экспертной



системой Jess и др.

Технологии облачных вычислений для разработки и управления интеллектуальными системами были использованы в российском проекте IACPaaS (Intelligence Application, Control and Platform as a Service), который поддерживает единые технологические принципы разработки, использования прикладных и инструментальных интеллектуальных систем и управления ими [7]. Проект IACPaaS разрабатывается с целью обеспечения доступа через интернет к функциональности интеллектуальных систем; создания единой среды для функционирования интеллектуальных систем, инструментальных средств для их разработки и управления; обеспечения кооперативной деятельности пользователей систем, экспертов, специалистов предметных областей и программистов.

**Постановка задачи исследования.** Таким образом, актуальной и важной задачей является разработка общедоступной и удобной в использовании интегрированной среды для создания и управления интеллектуальными системами на основе технологий облачных вычислений.

**Облачная платформа разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.** Платформа обеспечивает поддержку всех этапов по разработке интеллектуальных систем поддержки при-

нятия решений (СППР), их адаптацию для решения прикладных задач в любых предметных областях, хранение баз знаний и данных в «облачных» датацентрах, предоставление доступа к интеллектуальным системам как к сервисам удалённо через веб-интерфейс.

Платформа может быть полезна специалистам и экспертам в различных предметных областях – доступ к интеллектуальным СППР (реализация модели SaaS) и разработчикам интеллектуальных СППР – доступ к средствам их разработки (реализация модели PaaS).

Задачи интеллектуальной поддержки принятия решений могут возникать на различных уровнях управления в организации. В этом случае осуществляется интеллектуализация различных информационных систем, которые выступают в этом случае источниками первичной информации. В первом сценарии (рис. 1) использования облачной платформы рассматривается инфраструктура пользователя. Средствами платформы разрабатывается база знаний интеллектуальных систем и формируется репозиторий метаданных для доступа к первичным источникам информации. Во втором сценарии средствами платформы возможно также создание базы данных в облаке, для которой настраивается репозиторий метаданных для доступа и база знаний СППР.

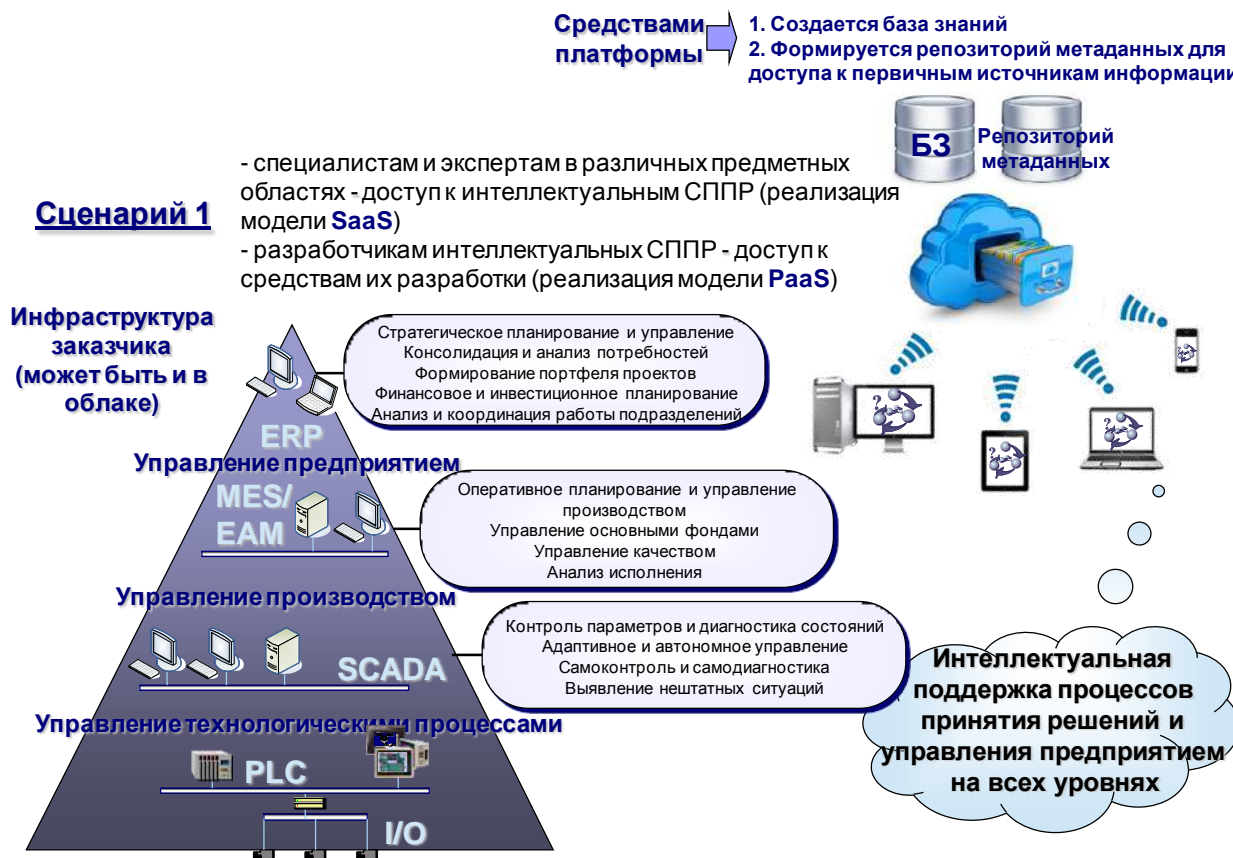


Рис. 1 – Основной сценарий использования облачной платформы разработки интеллектуальных СППР

Пользователь с главной страницы сайта проекта может ознакомиться с имеющимися готовыми СППР. Если какая-то из них его заинтересует, он может оформить на нее подписку, авторизовавшись в

системе, далее по своему усмотрению осуществить необходимую коррекцию базы знаний и репозитория, получив тем самым СППР для решения своих логико-аналитических задач (рис. 2). Также пользователь

может разработать свою собственную СППР. Основным режимом работы с СППР является вопросно-ответный, где пользователь выбирает интересующий его вопрос, система производит актуализацию данных из инфраструктуры пользователя или датацентра, осуществляет логический вывод и выдает результат пользователю на естественном языке. Возможно также сохранение результатов вывода в облаке, а также передача их в другие информационные системы через API.

Таким образом, интеллектуальные СППР «облака» позволяют производить в режиме реального времени получение данных из серверов датацентра или внешних источников, рассуждения на основе правил, хранящихся в базе знаний, предоставление результатов для визуализации в естественно-языковой форме для пользователей, архивирования, выдачи в другие информационные системы. Представление знаний в системе осуществляется на основе логических моделей исчисления предикатов первого порядка, а логический вывод с использованием модифицированного метода резолюций с учетом проблемы вычислительной разрешимости. Поддерживается работа с онтологиями и вывод на них. Облачные сервисы обеспечивают наполнение, корректировку и пополнение базы знаний интеллектуальной системы в процессе ее эволюционного развития. При создании моделей знаний используется простой и удобный язык описания экспертных знаний.



Рис. 2 – Режимы использования платформы

Поддержка различных источников данных и веб-сервисов позволяет проще интегрировать СППР в разнородное программное окружение.

Интеллектуальные СППР создаются для решения следующих задач:

- анализ, оценка и распознавание ситуаций, объектов;
- контроль, оценка и диагностика состояний, параметров;
- оценка важности и приоритета альтернатив;
- выявление и оповещение о чрезвычайных, аварийных ситуациях, угрожающих состояний и их регистрация;
- прогнозирование развития событий, ситуаций и

действий;

- реализация алгоритмов и сценариев действий;
- формирование рекомендаций, советов и оценивание вариантов решений;
- обеспечение быстрой настройки, адаптации и модификации системы к новым условиям эксплуатации.

Функциональные возможности платформы облачных сервисов:

- создание прикладных интеллектуальных СППР для любых предметных областей и информационных систем с целью их интеллектуализации;
- предоставление контролируемого доступа к интеллектуальным системам через Интернет;
- обеспечение единой среды разработки, выполнения и управления интеллектуальными системами для коллективной деятельности пользователей, экспертов и специалистов различных предметных областей при корректировке и пополнении баз знаний в процессе эволюционного развития;
- средства интеграции с другими информационными системами и различными СУБД;
- реализация дедуктивного механизма логического вывода при разных стратегиях сокращения перебора, что обеспечивает производительность системы;
- встроенная библиотека функций и эффективный механизм подключения разных расчетных сервисов;
- диалоговое взаимодействие и формирование ответов на поставленные вопросы осуществляется на естественном языке;
- возможность формирования цепочки событий, фактов, критериев и правил объяснения предлагаемых решений.

Создаваемые СППР могут быть условно отнесены к одному из четырех типов:

- СППР диагностики – определяют характер отклонения контролируемых показателей от нормы и на основе этого решают задачу выявления ситуации;
- СППР мониторинга – ориентированы на непрерывную интерпретацию данных в реальном времени и сигнализацию о выходе тех или иных параметров за допустимые границы;
- СППР прогнозирования – делают заключения о будущем развитии событий, исходя из текущей ситуации, прогнозируют развитие при разных схемах решения;
- СППР планирования – определяют оптимальные планы действий и осуществляют контроль за их выполнением.

Платформа разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений состоит из следующих компонентов (рис. 3):

- интегрированная среда разработки – средства графического интерфейса пользователя, включающие редактор базы знаний, различные мастера, средства контроля и отладки;
- база знаний – включает в себя базу правил или аксиом и базу вопросов и предназначена для формализованного описания логических задач на простом

внутреннем языке описания экспертных знаний;

- модуль логического вывода – центральный элемент ядра программного комплекса, предназначенный для логического вывода следствий (ответов) из системы правил (аксиом), которые находятся в базе знаний, с использованием модифицированного метода резолюций;

- библиотека встроенных функций – предназначена для выполнения соответствующих функций, отношений, алгоритмов в процессе логического вывода и используется при формировании базы правил;

- библиотека означающих/расчетных модулей – система позволяет практически любой программный компонент подключать к системе в качестве предиката для логических правил. Библиотека включает готовые программные модули, среди которых: оценка с помощью метода анализа иерархий, решение оптимизационных задач различными методами, нейросетевой вычислительный модуль, генетический алгоритм и др.;

- планировщик – определяет порядок обработки логических задач, взаимодействует с источниками данных, запускает процесс логического вывода;

- модуль контроля параметров – обеспечивает работу системы в режиме реального времени с архивированием результатов, выдачей экстренных сообщений и выработкой управляющих воздействий;

- модуль алгоритмов действий – поддержка и сопровождение действий пользователя в различных ситуациях с использованием базы алгоритмов или сценариев;

- модуль объяснения – предоставляет исчерпывающую информацию о причинах получения того или иного ответа (фактах и правилах), задействованных в логическом выводе, что облегчает эксперту тестирование системы и повышает доверие пользователя к полученному результату;

- модуль формирования управляющих воздействий – предназначен для формирования управляющих воздействий и выдачи их во внешние устройства и другие информационные системы;

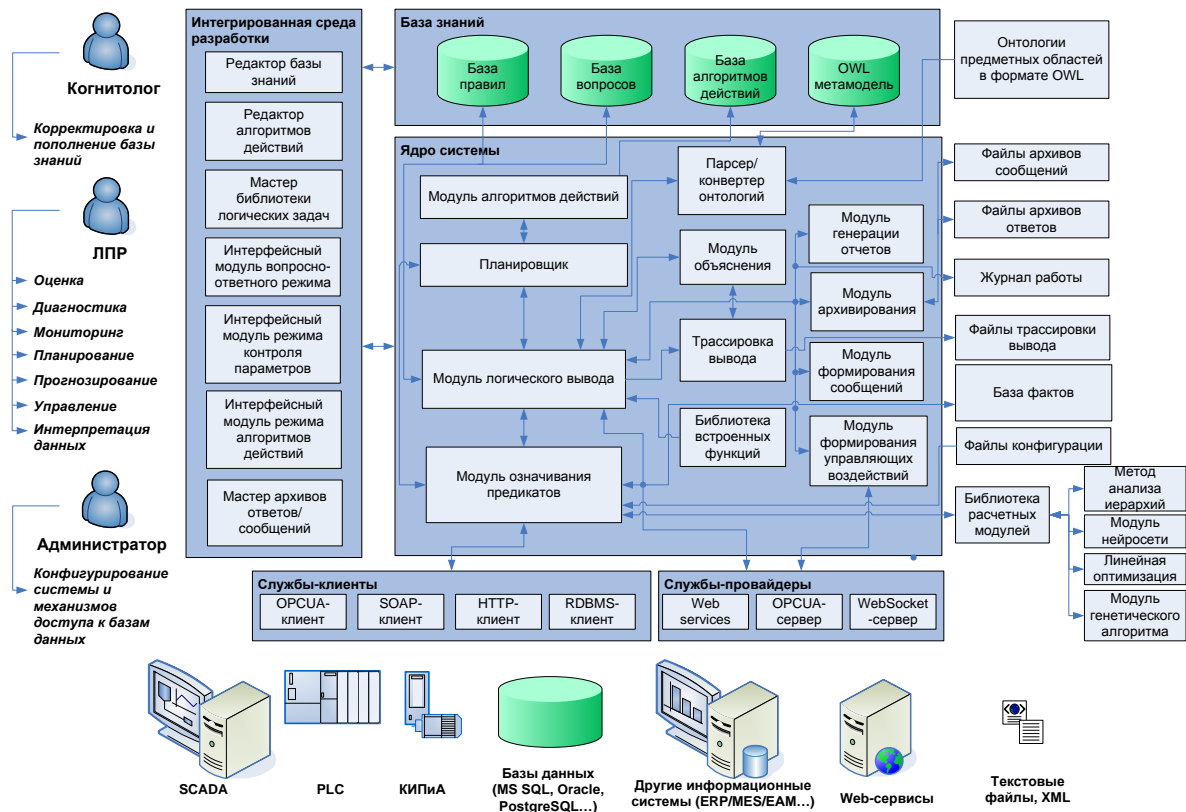


Рис. 3 – Состав платформы разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений

- модуль архивирования – архивирование результатов решения логических задач;

- модуль генерации отчетов – формирование отчетов в формате doc и html;

- парсер/конвертер онтологий OWL – предназначен для преобразования онтологий в формате OWL во внутренний язык описания экспертных знаний, для чего используются метамодели, включающие в себя правила преобразования в онтологические конструкции, механизмы распознавания концептов и значений атрибутов, а также позволяющие реконструировать

отношения между концептами в онтологии. В ходе логического вывода система позволяет также установить корректность онтологии, является ли она полной, нет ли нарушений в семантических связях, т.е. все извлеченные факты подтверждаются фактами из онтологии;

- универсальный означающий модуль (RDBMS-клиент) – обеспечение доступа для получения фактов из баз данных;

- службы-клиенты (SOAP, HTTP (XML/JSON), OPC UA) – предназначены для взаимодействия с тем

или иным внешним API источника данных;

- службы-провайдеры (Web services, Web Socket, OPC UA) – предоставляют программный интерфейс API для доступа к функциональным возможностям системы, например, получение значений переменных всех предикатов, запуск логического вывода и др.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений, помещенная в облако, функционирует в следующих режимах:

- анализ, оценка и распознавание ситуаций;
- контроль и диагностика состояний;
- оценка важности приоритета;
- корректировка и пополнение базы знаний;
- выявление и оповещение о нештатных ситуациях;
- консультирование или вопросно-ответный режим (система выдает ответы – рекомендации, сообщения – на конкретные вопросы на естественном языке);
- автоматический (формируются и архивируются ответы на сформулированные заранее вопросы – контроль параметров с выдачей экстренных сообщений и формированием рекомендаций);
- объяснение результатов (выдается исчерпывающая информация о причинах получения данного ответа – фактов и правил, задействованных в процессе логического вывода).

**Выводы.** Предложенная в работе платформа позволит облегчить разработку, тестирование, развертывание и сопровождение прикладных интеллектуальных систем без необходимости инвестиций в инфраструктуру и программную среду; позволит повысить степень интеллектуализации и адаптации существующих информационных систем к изменению задач и целей функционирования; позволит накапли-

вать и повторно использовать знания, а не жестко заданные структуры данных и алгоритмы обработки; позволит повысить качество, достоверность и получить сокращение времени выработки и принятия решений; повысить гибкость и эффективность бизнес-процессов.

**Список литературы:** 1. Джексон П. Введение в экспертные системы / П. Джексон. – СПб. : Вильямс, 2001. – 624 с. 2. Братко И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке Prolog / И. Братко; пер. с англ. – [3-е изд.]. – М. : Вильямс, 2004. – 640 с. 3. Частиков А. П. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS / А. П. Частиков, Т. А. Гаврилова, Д. Л. Белов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 608 с. 4. Strauss M. Jess. The Java Expert System Shell / M. Jess Strauss // AI Tools. – 2007. – 33 p. 5. Рыбина Г. В. Автоматизированное рабочее место для построения интегрированных экспертных систем: комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ / Г. В. Рыбина // Новости искусственного интеллекта. – 2005. – № 3. – С. 69–87. 6. Попович В. В. Интеллектуальная ГИС в системах мониторинга / В. В. Попович, С. Н. Потапычев, А. В. Панькин [и др.] // Труды СПИИРАН. – Вып. 3. – Т. 1. – СПб. : Наука, 2006. – С. 172–184. 7. Грибова В. В. Проект IACPaaS. Комплекс для интеллектуальных систем на основе облачных вычислений / В. В. Грибова, А. С. Клецев, Д. А. Крылов [и др.] // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – №1. – С. 27–35.

**Bibliography (transliterated):** 1. Jackson, P. *Vvedenie v jekspertnye sistemy*. St. Petersburg: Viliams, 2001. Print. 2. Bratko, I. *Algoritmy iskusstvennogo intellekta na yazyke Prolog*. Moscow: Viliams, 2004. Print. 3. Chastikov, A. P., T. A. Gavrilova and D. L. Belov *Razrabotka jekspertnyh sistem. Sreda CLIPS*. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2003. Print. 4. Strauss, M. Jess. "The Java Expert System Shell." *AI Tools*, 2007. Print. 5. Rybina, G. V. "Avtomatizirovannoe rabochee mesto dlja postroeniya integrirovannyh jekspertnyh sistem: kompleks AT-TEKNOLOGIJA." *Novosti iskusstvennogo intellekta* 3 (2005): 69–87. Print. 6. Popovich, V. V., et al. "Intellektualnaya GIS v sistemah monitoringa." *Trudy SPIIRAN*. Vol. 1.3. St. Petersburg: Nauka, 2006. 172–184. Print. 7. Gribova, V. V., et al. "Proekt IACPaaS. Kompleks dlja intellektual'nyh sistem na osnove oblačnyh vychislenij." *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij* 1 (2011): 27–35. Print.

Поступила (received) 05.02.2015

**Прохоров Александр Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; тел.: (057) 788-43-02; e-mail: al\_val@mail.ru.

**Prokhorov Alexander Valeriyevych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Information Control Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv; tel.: (057) 788-43-02; e-mail: al\_val@mail.ru.

**Прохоров Валерий Павлович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор Научного парка «Радиоэлектроника и информатика», г. Харьков; тел.: (057) 702-11-33; e-mail: nprei.kharkov@gmail.com.

**Prokhorov Valery Pavlovych** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Director of Science park «Radio electronics and informatics», Kharkiv; tel.: (057) 702-11-33; e-mail: nprei.kharkov@gmail.com.

**Матюшко Анастасия Олеговна** – аспирант кафедры информационных управляющих систем Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; тел.: (057) 788-43-02; e-mail: nanaska\_91@mail.ru.

**Matiushko Anastasiya Olegovna** – postgraduate of Information Control Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv; tel.: (057) 788-43-02; e-mail: nanaska\_91@mail.ru.

Э. Е. РУБИН, М. Д. ГОДЛЕВСКИЙ, В. С. БАРАШ

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ МОДЕЛИ ЗРЕЛОСТИ SPICE INTEGRATION

Рассматриваются подходы к улучшению качества процесса разработки программного обеспечения на основе моделей зрелости CMMI и SPICE. Проводится их сравнительный анализ и предлагается подход к формированию гибкой структуры модели зрелости SPICE, которая учитывает недостатки существующих моделей. Реализация гибкой структуры осуществляется путём структурно-параметрического синтеза модели зрелости SPICE Integration.

**Ключевые слова:** качество, модель зрелости, процесс разработки программного обеспечения, анализ, структурный синтез.

**Введение.** В современных условиях проблема оценки и улучшения качества процесса разработки программного обеспечения (ПРПО) актуальна в силу увеличения сложности программных систем и процессов в IT-компаниях. Даже с достаточным финансированием и имея необходимое время не все IT-компании гарантируют успех разработки программного обеспечения (ПО). Одна из причин – процессы по разработке ПО не имеют достаточный уровень зрелости.

Для решения проблемы оценки зрелости ПРПО были созданы подходы, среди которых выделяют два основных [1]:

- Capability Maturity Model Integration – CMMI;
- Software Process Improvement and Capability dEtermination – SPICE.

Кратко рассмотрим концепции каждого из них.

Основными понятиями модели зрелости CMMI являются [2]:

- фокусная область, которая представляет собой категорию действий, связанных с отдельной дисциплиной процесса разработки;
- практика, которая представляет собой отдельное действие в рамках определённой фокусной области.

CMMI реализована в двух вариантах – дискретное и непрерывное представления, в которых определены такие понятия как «уровень зрелости» и «уровень возможности», соответственно. Эти понятия соответствуют шкалам для оценки текущего уровня ПРПО организации и уровня фокусных областей. Модель зрелости определяет 5 уровней зрелости (maturity levels – ML) и 4 уровня возможности (capability levels – CL) [3].

Необходимо подчеркнуть интегральность модели зрелости CMMI, которая заключается в том, что при переходе на следующий уровень зрелости новые фокусные области, соответствующие этому уровню, и ранее задействованные следует реализовать на требуемом уровне возможности. Модель зрелости CMMI используется для внешнего аудита, обеспечивая аттестацию ПРПО организации с получением соответствующего сертификата. При этом основным недостатком модели зрелости CMMI является то, что она не учитывает особенности организаций, такие как используемые методологии разработки и управления проектами, цели и предметную область деятельности организации.

Основными понятиями модели зрелости SPICE (стандарт ISO/IEC 15504) являются [4]:

- практика – деятельность, которая вносит вклад в цели процесса для увеличения его возможности;
- процесс – совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы;
- атрибут оценки процесса – измеримая характеристика возможности процесса.

В отличие от CMMI, модель зрелости SPICE реализована только в одном варианте – непрерывное представление. Следовательно, SPICE определяет только понятие «уровень возможности», которое соответствует шкале оценки возможности отдельно взятых процессов, и, как следствие, не позволяет сделать оценку ПРПО организации в целом. Модель зрелости SPICE описывает 6 уровней возможности. Для достижения процессом того или иного уровня возможности необходимо чтобы были реализованы атрибуты процесса, соответствующие желаемому уровню возможности, на заданном уровне. Для всех процессов стандарт определяет 9 различных атрибутов [5].

**Постановка задачи.** Так как модель зрелости CMMI не позволяет учитывать особенности организации, а модель зрелости SPICE не обеспечивает получение агрегированной оценки качества ПРПО организации, предлагается разработать методологию гибкой структуры модели оценки уровня зрелости процесса разработки на базе модели зрелости SPICE, основной целью которой будет возможность дополнительно учитывать три фактора:

- особенности используемой методологии управления проектами и модели жизненного цикла (ЖЦ) ПРПО в организации;
- особенности предметной области;
- цели организации.

Учитывая то, что разрабатываемая модель зрелости будет базироваться на модели зрелости SPICE и при этом позволять получить скалярную оценку уровня зрелости ПРПО организации с учётом перечисленных ранее 3-х факторов, то назовём её SPICE Integration. Выставленная оценка с помощью модели зрелости SPICE Integration является уникальной для каждой организации и поэтому может быть использована только для внутреннего аудита.



Для построения модели зрелости SPICE Integration необходимо ответить на следующие вопросы:

- сколько необходимо уровней зрелости для организации?
- сколько и какие процессы должны рассматриваться для различных уровней зрелости?
- каким уровням возможности должны соответствовать процессы для достижения соответствующего уровня зрелости?

**Вербальное описание структурно-параметрического синтеза.** Задача формирования модели зрелости SPICE Integration является задачей структурно-параметрического синтеза. Под структурным синтезом понимается определение количества уровней зрелости и перечня процессов для каждого уровня. Параметрический синтез предполагает определение значений уровней возможности для каждого процесса, принадлежащего определённому уровню зрелости.

В работе предлагается использовать 5 уровней зрелости по аналогии с СММИ, а также интегральный подход при формировании уровней зрелости.

Каждый уровень зрелости характеризуется перечнем процессов и значениями их уровней возможности – профайлом уровня зрелости. На рис. 1 в качестве наглядности изображён пример профайла уровня зрелости, где на оси абсцисс находится измерение «Процесс», а на оси ординат – измерение «Уровень возможности».

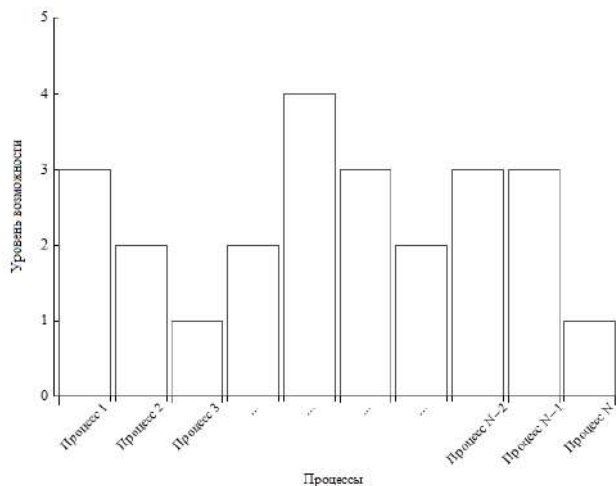


Рис. 1 – Пример профайла уровня зрелости

Понятию «уровень зрелости» ПРПО соответствует шкала качества, где первый уровень зрелости будем считать минимально возможным для выполнения работ, а пятый уровень зрелости – максимальным, при котором достигается наилучшее качество. Существует большое количество различных шкал, но наиболее эффективной является шкала Саати [6], которую можно считать аналогом шкалы уровней зрелости модели СММИ.

Будем использовать фундаментальное свойство систем [7], которое гласит, что полезность любой системы от вложенных ресурсов на всём интервале

жизненного цикла качественно может быть описана логистической кривой, которая имеет S-образный характер (см. рис. 2).

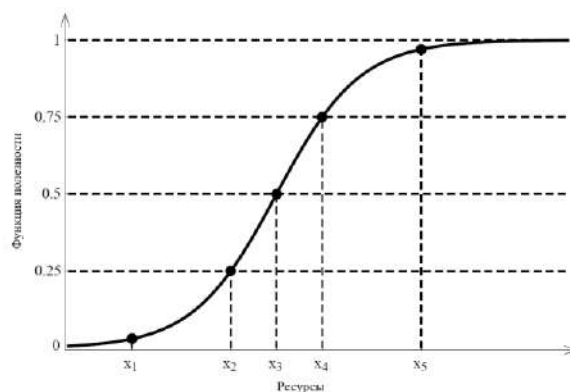


Рис. 2 – Логистическая кривая

Область изменения значений функции полезности имеет диапазон (0,1) (рис. 2). Согласно предлагаемой шкале уровней зрелости, пятый уровень соответствует наибольшему значению полезности, которое стремится к 1, а первый уровень соответствует наименьшему значению полезности близкому к 0. В работе сделано предположение, что при переходе между уровнями зрелости превосходство ПРПО возрастает равномерно. Таким образом, интервал изменения функции полезности делится на приблизительно равные 4 части с уровнями зрелости от первого до пятого. Второй уровень зрелости соответствует значению функции полезности 0.25, третий – 0.5, а четвёртый – 0.75. На рис. 2 ось абсцисс представляет собой ресурсы, которые необходимо задействовать организации для достижения соответствующего уровня зрелости, а точки  $x_1, x_2, x_3, x_4$  и  $x_5$  соответствуют их конкретным значениям. В силу S-образного характера кривой, переход с уровня на следующий уровень соответствует непропорциональному вкладу ресурсов. Так, например, исходя из рис. 2, наиболее дорогостоящими улучшениями являются переходы с первого на второй уровень зрелости, а также с четвёртого на пятый. Перейдём к рассмотрению основных этапов формирования модели оценки.

На первом этапе выбирается базовая модель, представляющая собой перечень всех процессов, которые могут быть задействованы при разработке ПО. Различный выбор базовых моделей в контексте разработки ПО представлен стандартами, такими как ISO/IEC 12207:2008, ISO/IEC TR 15504-5:2012 и т.д. В качестве основной базовой модели выбран стандарт ISO/IEC TR 15504-5:2012, согласно которому при разработке ПО могут быть задействованы 45 процессов, которые в свою очередь сгруппированы по 7-ми группам [8]. На втором этапе формируются профайлы первого и пятого уровней зрелостей. На рис. 3 в качестве примера изображён результат его выполнения.

Третий этап посвящён синтезу профайлов промежуточных уровней зрелости. При этом необходимо учитывать два ключевых аспекта:

- інтегральність підходу к формуванню переліка процесів;
- інтегральність підходу к определению уровня возможности процессов.



Рис. 3 – Профайлы первого и пятого уровней зрелости

Первый аспект подразумевает, что на первом уровне формируется базовый перечень процессов, который присутствует во всех остальных уровнях зрелости. Если на пятом уровне зрелости появились дополнительные процессы, это говорит о том, что они были добавлены при формировании промежуточных уровней зрелости или на заключительном пятом.

Второй аспект подразумевает, что уровни возможностей процессов на различных уровнях зрелости допускают два типа поведения:

- сохранить свой уровень возможности;
- повысить свой уровень возможности.

Таким образом, при формировании промежуточных уровней необходимо принимать во внимание как начальные значения уровней возможности (первый уровень зрелости), так и конечные (пятый уровень зрелости).

Для решения задачи формирования модели оценки ПРПО предлагается использовать экспертные методы, так как решаемая задача является трудно формализуемой. Эксперты выступают в роли своеобразного измерительного прибора, используя свои знания, опыт и интуицию, с целью количественной оценки каждого процесса.

Рассмотрим задачу формирования профайлов первого и конечного уровней зрелости. На рис. 4 представлена структура базовой модели на основе стандарта ISO/IEC TR 15504-5:2012, которая используется в работе. В работе считается, что все процессы, у которых существуют подпроцессы, являются их агрегацией и для упрощения структуры все подпро-

цессы вынесены на уровень процессов, заменяя сам процесс, которому они соответствуют.

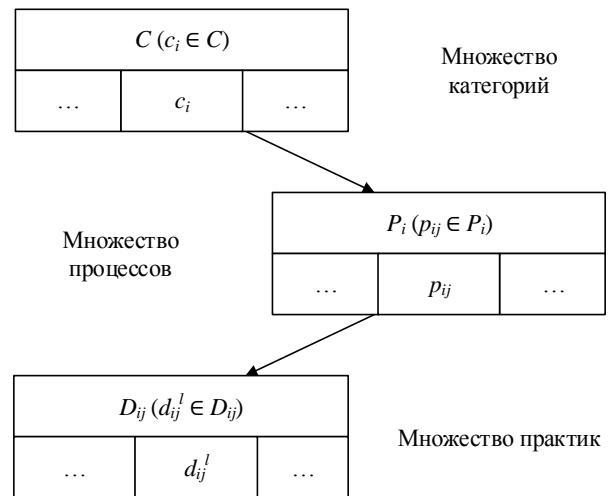


Рис. 4 – Структура базовой модели

Выбранная базовая модель определяет множество категорий

$$C = \{c_i, i = \overline{1,7}\}, \quad (1)$$

где  $c_i$  –  $i$ -я категория, которой соответствует множество процессов

$$P_i = \{p_{ij}, j = \overline{1, n_i}\}, i = \overline{1,7}, \quad (2)$$

где  $p_{ij}$  –  $j$ -й процесс  $i$ -й категории;

$n_i$  – количество процессов, входящих в  $i$ -ю категорию.

В свою очередь каждому процессу  $p_{ij}$  соответствует множество практик  $D_{ij}$ , где  $d_{ij}^l$  –  $l$ -я практика  $j$ -го процесса  $i$ -й категории.

Множество

$$E = \{e_h, h = \overline{1, v}\} \quad (3)$$

представляет собой совокупность независимых экспертов, которые были отобраны для проведения экспертизы,  $v$  – количество экспертов. Каждый  $h$ -й эксперт на основании своего опыта, знаний и интуиции проводит как оценивание значимости каждой категории процессов, так и оценивание значимости каждого процесса для категории, в которой он состоит. Для этого используется метод парных сравнений со шкалой Саати.

Рассмотрим матрицу парных сравнений экспертов, которая предназначена для определения значимости категорий. При этом оценки эксперты выставляют, основываясь на особенностях присущих конкретной организации, отвечая на вопрос: «Насколько более значимой является одна категория процессов нежели другая для максимального достижения поставленных перед организации целей с учётом её особенностей?». Таким образом, эксперты выставляют оценки и формируют матрицы:

$$\mathbf{A}^h = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_{12}^h & \dots & \alpha_{17}^h \\ \alpha_{21}^h & 1 & \dots & \alpha_{27}^h \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{71}^h & \alpha_{72}^h & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}^h$  – матрица парных сравнений, заданная  $h$ -м экспертом для сравнения категорий процессов;

$\alpha_{ik}^h$  – оценка важности  $i$ -й категории по отношению к  $k$ -й, выставленная  $h$ -м экспертом,  $i, k = \overline{1,7}$ .

Далее определяется согласованность матриц  $\{\mathbf{A}^h\}$  и, в случае достаточного уровня согласованности, вычисляются вектора приоритетов [8] категорий процессов:

$$\mathbf{\Omega}^h = (\omega_1^h \ \omega_2^h \ \dots \ \omega_7^h)^T, \quad h = \overline{1, v}, \quad (5)$$

где  $\omega_i^h$  – приоритет  $i$ -й категории, определённый  $h$ -м экспертом.

Для определения значимости отдельных процессов аналогично для каждой категории создаются матрицы парных сравнений. При этом оценки эксперты выставляют, отвечая на вопрос: «Насколько более значимым является один процесс категории по отношению к другому для максимального достижения целей рассматриваемой категории с учётом поставленных целей организации и её особенностей?». Таким образом, эксперты выставляют оценки и формируют матрицы:

$$\mathbf{B}_i^h = \begin{pmatrix} 1 & \beta_{12}^{hi} & \dots & \beta_{1n_i}^{hi} \\ \beta_{21}^{hi} & 1 & \dots & \beta_{2n_i}^{hi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{n_i 1}^{hi} & \beta_{n_i 2}^{hi} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{B}_i^h$  – матрица парных сравнений, заданная  $h$ -м экспертом для процессов  $i$ -й категории;

$\beta_{jl}^{hi}$  – оценка важности  $j$ -го процесса по отношению к  $l$ -му процессу  $i$ -й категории, выставленная  $h$ -м экспертом,  $j, l \in \overline{1, n_i}$ .

Далее определяется согласованность суждений экспертов и, в случае достаточного уровня, формируются вектора приоритетов [8]:

$$\mathbf{\Theta}_i^h = (\theta_{i1}^h \ \theta_{i2}^h \ \dots \ \theta_{in_i}^h)^T, \quad i = \overline{1,7}, \quad h = \overline{1, v}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{\Theta}_i^h$  – вектор приоритетов процессов  $i$ -й категории, определённый  $h$ -м экспертом;

$\theta_{ij}^h$  – приоритет  $j$ -го процесса  $i$ -й категории, определённый  $h$ -м экспертом.

Важность отдельно взятого процесса для достижения поставленных целей организации с учётом её особенностей рассчитывается по формуле:

$$\Psi_{ij}^h = \omega_i^h \cdot \theta_{ij}^h, \quad (8)$$

где  $\Psi_{ij}^h$  – приоритет  $j$ -го процесса  $i$ -й категории согласно суждениям  $h$ -го эксперта,  $\Psi_{ij}^h \in [0,1]$ ,  $j = \overline{1, n_i}$ ,  $i = \overline{1,7}$ ,  $\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{n_i} \Psi_{ij}^h = 1$ ,  $h = \overline{1, v}$ .

При экспертном оценивании очень важным вопросом является определение согласованности суждений экспертов, чтобы избежать субъективных точек зрения и их заинтересованности в том или ином решении. Поэтому следующим этапом является проверка согласованности. Для этого используется коэффициент ранговой конкордации Кендалла-Смита [9].

При достаточном уровне согласованности суждений экспертов проводится агрегация экспертных суждений и определяются весовые коэффициенты важности отдельных процессов по формуле:

$$\overline{\Psi}_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^v \Psi_{ij}^h}{\sum_{h=1}^v \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{n_i} \Psi_{ij}^h}, \quad (9)$$

где  $\overline{\Psi}_{ij}$  – весовой коэффициент  $j$ -го процесса  $i$ -й категории согласно суждениям экспертов.

На завершающем этапе проводится «отсечка» части процессов на основании заранее выставленного показателя  $\delta$ , который регулирует чувствительность системы и количество процессов, которые будут рассматриваться исходя из показателей  $\overline{\Psi}_{ij}$ . Оставшиеся процессы входят в структуру пятого уровня зрелости.

Аналогично приведённой процедуре происходит оценка степени значимости категорий и процессов для первого уровня зрелости. Изменяются лишь вопросы, на которые отвечают эксперты. Так, для категорий вопрос будет звучать: «Насколько более значимой является одна категория процессов нежели другая для минимального достижения поставленных целей организации с учётом её особенностей?», а для процессов: «Насколько более значимым является один процесс категории по отношению к другому для минимального достижения целей рассматриваемой категории с учётом поставленных целей организации и её особенностей?».

**Выводы.** В статье были рассмотрены подходы к улучшению качества ПРПО, а именно модели зрелости CMMI и SPICE (ISO/IEC TR 15504). Проведен сравнительный анализ моделей зрелости и предложен подход к созданию гибкой структуры модели зрелости на базе SPICE – SPICE Integration. Рассмотрен алгоритм структурного синтеза модели при формировании первого и пятого уровней зрелости на основании методологии коллективного экспертного оценивания. В дальнейших исследованиях будут рассмотрены проблемы структурного синтеза промежуточных уровней зрелости, а также параметрического синтеза для всех уровней зрелости.



**Список литературы:** 1. Андон Ф. И. Основы инженерии качества программных систем. 2-е изд. / Ф. И. Андон, Г. И. Коваль, Т. М. Коротун [и др.]. – К. : Академперіодика, 2007. – 672 с. 2. Брагинский И. Л. Модель и информационная технология управления качеством процесса разработки программного обеспечения в условиях ограниченных ресурсов: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / И. Л. Брагинский, М. Д. Годлевский. – Х. : Изд-во НТУ «ХПИ», 2013. – 141 с. 3. CMMI Product Team. CMMI for Development, Version 1.3 (CMU/SEI-2010-TR-033) / CMMI Product Team. – Pittsburgh : Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2010. – 470 p. 4. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-1 – 2009. Информационные технологии. Оценка процессов. Часть 1. Концепция и словарь. – М. : Стандартиформ, 2010. – 19 с. 5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2 – 2009. Информационные технологии. Оценка процессов. Часть 2. Проведение оценки. – М. : Стандартиформ, 2010. – 14 с. 6. Саати Т. Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Л. Саати, К. П. Кернс. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с. 7. Саркисян С. А. Большие технические системы. Анализ и прогноз развития / С. А. Саркисян, В. М. Ахундов, Э. С. Минаев. – М. : Наука, 1977. – 350 с. 8. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с. 9. Кендэл М. Ранговая корреляция / М. Кендэл. – М. : Статистика, 1975. – 216 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Andon, F. I., et al. *Osnovy inzhenerii kachestva programmyh sistem. 2nd ed.* Kyiv: Akadempriodika, 2007. Print. 2. Braginskij, I. L., and M. D. Godlevskiy. *Model' i informacionnaja tehnologija upravlenija kachestvom processa razrabotki programmnogo obespechenija v uslovijah ogranichennyh resursov: dissertacija na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk.* Kharkiv, 2013, Print. 3. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University. *CMMI Product Team. CMMI for Development, Version 1.3 (CMU/SEI-2010-TR-033).* Pittsburgh. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2010. Print. 4. *GOST R ISO/MJK 15504-1 – 2009. Informacionnye tehnologii. Ocenka processov. Chast' 1. Konceptija i slovar'.* Moscow: Standartinform, 2010. Print. 5. *GOST R ISO/MJK 15504-2 – 2009. Informacionnye tehnologii. Ocenka processov. Chast' 2. Provedenie ochenki.* Moscow: Standartinform, 2010. Print. 6. Saati, T. L., and K. P. Kerns. *Analiticheskoe planirovanie. Organizacija sistem.* Moscow: Radio i svjaz', 1991. Print. 7. Sarkisyan, S. A., V. M. Ahundov, and J. S. Minaev. *Bol'shie tehniccheskie sistemy. Analiz i prognoz razvitija.* Moscow: Nauka, 1977. Print. 8. Saati, T. L. *Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij.* Moscow: Radio i svjaz', 1993. Print. 9. Kendel M. *Rangovaja korrelyacija.* Moscow: Statistika, 1975. Print.

Поступила (received) 01.10.2015

**Рубин Эдуард Ефимович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057) 702-18-07; e-mail: eduard.rubin@nure.ua.

**Rubin Eduard Yefimovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 702-18-07; e-mail: eduard.rubin@nure.ua.

**Годлевский Михаил Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой «Программная инженерия и информационные технологии управления»; тел.: (057) 707-65-20; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Godlevskiy Mykhailo Dmytrovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (057) 707-65-20; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Бараш Виталий Сергеевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», магистрант; тел.: (097) 353-20-89; e-mail: vitalii.barash@outlook.com.

**Barash Vitalii Serhiyovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master Student; tel.: (097) 353-20-89; e-mail: vitalii.barash@outlook.com.

*А. С. КУЦЕНКО, И. М. ГОДЛЕВСКИЙ*

## СТРУКТУРА МОДЕЛИ КООРДИНАЦИИ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ДИСТРИБЬЮЦИИ

Приведены основные этапы формирования системы организационного управления логистикой дистрибуции. На основе конфигурирования логистической сети формируются участники цепочек поставок, которые являются основой для построения организационной структуры управления. В работе приведена структура модели координации для трехуровневой системы с использованием всех типов провайдеров. Сформированы ограничения, которые связывают локальные задачи различных уровней иерархии.

**Ключевые слова:** организационное управление, логистика, дистрибуция, цепочка поставок, координация, трехуровневая система управления.

**Введение.** Современный этап развития большинства стран мира характеризуется расширением масштабов и ростом производственных процессов и процессов управления, созданием в различных областях мировой экономики крупномасштабных систем со сложной структурой [1]. Характерными особенностями таких систем являются: длительные сроки реализации и реинжиниринга, значительные капиталовложения, высокая ресурсоемкость процессов развития систем и их отдельных элементов; тесная взаимосвязь с другими крупномасштабными системами и окружающей средой; распределенность входящих в них элементов на значительной территории (от регионального до глобального масштабов); «размытость границ» системы, что не позволяет однозначно определить состав всех ее элементов; необходимость учета требований к устойчивости и надежности функционирования систем; комплексный характер управления элементами системы [2, 3].

К особому классу крупномасштабных распределенных систем относятся транснациональные, национальные и региональные логистические системы различного назначения, задачи формирования оптимальных программ развития которых включают:

- выбор состава и размещение по территории производственных и транспортных элементов системы с учетом динамики их функционирования и развития;
- определение объемов и направлений транспортных потоков;
- распределение ресурсов между элементами системы по подпериодам планирования;
- формирование распределенной организационной структуры управления.

Функции выше перечисленных систем и протекающие в них процессы распределены, рассредоточены по подсистемам. Основными характерными особенностями распределенных систем являются [4, 5]:

- 1) наличие общей цели системы при распределении ее функций по отдельным подсистемам;
- 2) территориальная рассредоточенность подсистем;
- 3) представление общей задачи системы в виде комплекса взаимосвязанных локальных подзадач, обусловленное, в первую очередь, сложностью постановки проблемы, отсутствием средств и необходи-

мостью централизованного хранения данных и решения задачи в целом;

- 4) необходимость параллельного и асинхронного решения некоторых локальных задач различными исполнителями;

- 5) наличие, в рамках интересов всей системы или компромиссного варианта решения проблемы, свободы выбора при формировании решений каждой отдельной локальной задачи;

- б) интенсивное использование средств обмена информацией между подсистемами и средств согласования процедур решения локальных задач.

Одной из мало изученных и формализованных задач в области логистики является задача формирования структуры и системы организационного управления (СиСОУ) для распределенных логистических систем (РЛС) при стратегическом планировании.

Поэтому актуальной является проблема разработки моделей координации организационного управления для такого класса сложных систем.

**Постановка задачи.** Согласно [6] основными этапами формирования системы организационного управления логистикой дистрибуции являются:

- 1) конфигурирование логистической сети;
- 2) формирование участников сети цепочек поставок;
- 3) определение центров влияния и типов связей бизнес-процессов;
- 4) синтез вариантов иерархической организационной структуры;
- 5) формирование локальных задач и задач координации иерархической системы управления РЛС;
- б) оптимизация функционирования РЛС на основе межорганизационной и межфункциональной координации;
- 7) принятие решения по выбору СиСОУ логистикой дистрибуции на основе формирования множества альтернативных вариантов.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев организационные структуры распределенных систем являются иерархическими, в которых иерархия основана на понятии отношения приоритета взаимодействия между множеством подсистем.

С целью исследования иерархической распределенной системы обычно ее рассматривают в виде

композиции отдельных двухуровневых систем [7], на верхнем уровне которых находятся управляющие подсистемы, а на нижнем управляемые элементы (подсистемы). При анализе двухуровневой системы рассматривают два класса задач: задачи самоуправления для подсистем нижнего и верхнего уровней и задачи управления подсистемами нижнего уровня путем координации их функционирования. Так как цели подсистем нижнего и верхнего уровней могут быть различными, будем говорить о различных видах координаемости.

1. Координируемость относительно задачи, решаемой в подсистеме верхнего уровня. В этом случае при некотором выбранном управляющем воздействии в результате решения задачи верхнего уровня в каждой подсистеме нижнего уровня найдутся такие локальные управляющие воздействия, при которых критерий задачи верхнего уровня достигает своего глобального оптимума.

2. Координируемость относительно задач, решаемых в каждой из подсистем рассматриваемой двухуровневой системы. Для этого варианта координируемости локальные управляющие воздействия задач нижнего уровня обеспечивают глобальный оптимум в задаче верхнего уровня.

3. Координируемость относительно компромиссного значения целевых функций подсистем рассматриваемой двухуровневой системы. Такая ситуация характерна при наличии конфликта как между подсистемами одного уровня, так и между подсистемами различных уровней. Если конфликт носит не антагонистический характер, то выбор управляющего воздействия сводится к принятию решения по множеству критериев отдельных подсистем согласно [8].

В работе [9] приведены различные варианты организационной структуры системы управления цепочками поставок логистической системы. На примере трехуровневой системы рассмотрим структуру модели координации организационного управления при наличии на различных уровнях иерархии различных типов провайдеров.

**Типы провайдеров логистических услуг.** Ядром, около которого создается логистическая система дистрибуции, является центральная компания, производящая оригинальную продукцию или компания, которая строит логистическую систему цепочек поставок продукции различных производителей и решает задачу координации функционирования всех участников сети. В первом и втором случае для таких компаний будем использовать аббревиатуру OEM (Original Equipment Manufactures). Перед OEM стоит задача разработки эффективных методов управления бизнес-процессами цепочек поставок на основе систем поддержки принятия решений.

В случае простейшей логистической сети цепочек поставок отдельные бизнес-процессы выполняются непосредственно функциональными подсистемами (ФП) OEM. Наличие большого количества уровней логистической сети дистрибуции, а также бизнес-процессов на каждом уровне приводит к необходимости передачи для выполнения ряда бизнес-про-

цессов различного рода провайдерам, которые имеют меньшие логистические издержки, лучшее качество логистического сервиса и т. д. В то же время OEM освобождает ресурсы на выполнение своих основных задач. В дальнейшем для таких провайдеров будем использовать аббревиатуру 3PL провайдер (Third Party Logistics Provider), которые являются самостоятельными юридическими лицами и имеют свои цели (прибыль, доля рынка и т. д.). Базовыми функциями для 3PL провайдеров являются: транспортные перевозки, складирование, управление запасами, информационные услуги. В том случае, если OEM является транснациональной компанией с множеством уровней поставщиков, возникает проблема координации большого количества 3PL провайдеров и при недостатке ресурсов используется особый тип провайдеров, которые называются системными интеграторами или 4PL провайдерами (Fourth Party Logistics Provider). Фактически они берут на себя обязанности OEM по координации ряда 3PL провайдеров. Обычно 4PL провайдеры не имеют своих собственных активов, используют для координации ресурсы OEM. Дальнейшее развитие логистических услуг связано с появлением нового типа провайдеров, которые выполняют функции аналогичные 4PL системным интеграторам, но в отличие от них имеют свои активы и самостоятельно выполняют отдельные бизнес-процессы в цепочке поставок. В зарубежной литературе такие компании имеют аббревиатуру LLP (Lead Logistics Provider). Они берут полностью на себя ответственность за выполнение и координацию бизнес-процессов цепочек поставок, высвобождая ресурс OEM для решения более важных и свойственных ей задач.

**Структура модели координации трехуровневой организационной системы.** Рассмотрим структуру модели координации трехуровневой организационной системы управления цепочками поставок, включающей все виды провайдеров, рассмотренных выше (рис. 1). Выделим основные задачи, которые решаются на каждом уровне управления и введем управляющие переменные, используемые на соответствующих уровнях иерархии.

Основные структурные единицы сети цепочек поставок находятся на первом уровне иерархии. Это множества  $P_2$  и  $P_3$ , соответственно, функциональных подразделений LLP провайдеров и OEM, а также множества  $P_1$  и  $P_4$ , соответственно, 3PL провайдеров, координация функционирования которых осуществляется 4PL провайдером и OEM. Каждое функциональное подразделение или 3PL провайдер реализуют свою деятельность на основе выполнения множества  $\{J_l, l \in P_\lambda\} \lambda = \overline{1,4}$  логистических функций, обособление которых обычно связано с выделением в компании структурных подразделений и/или отдельных менеджеров, отвечающих за реализацию логистической функции. Именно на этом этапе решаются вопросы эффективности путем выделения для каждой  $j$ -й логистической функции множества  $K_j$  ключевых показателей эффективности, где  $j \in J_l, l \in P_\lambda, \lambda = \overline{1,4}$ .

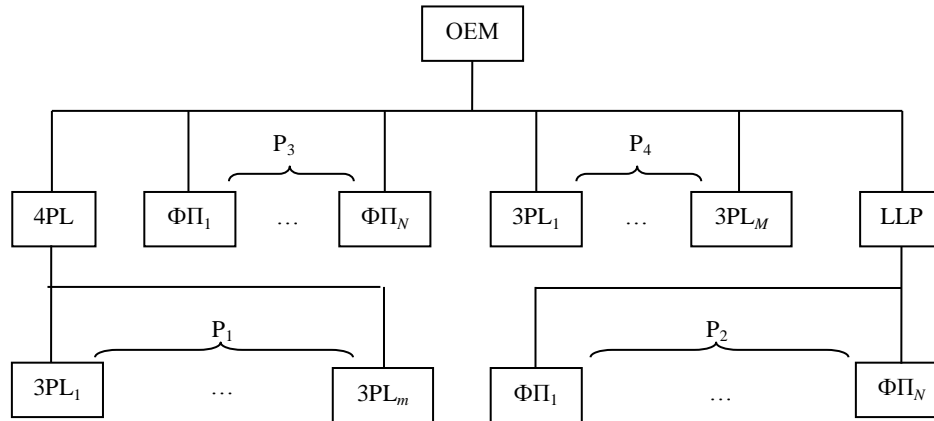


Рис. 1 – Структура трехурвневой системы организационного управления

В качестве управляющих вводятся дискретные переменные  $x_{kl}^t$ , определяющие некоторый  $\alpha$ -вариант вклада финансовых ресурсов в  $t$ -м подпериоде планирования для коррекции  $k$ -го ключевого показателя эффективности при условии

$$x_{ka}^t \in \{0,1\}, \sum_{a \in A_k} x_{ka}^t = 1,$$

где  $A_k$  – множество вариантов вклада ресурсов.

Основное отличие 3PL провайдеров от ФП первого уровня иерархии заключается в том, что 3PL провайдер использует финансовые ресурсы из двух источников: свои собственные –  $R_{sl}^t, l \in P_s, s=1,4$ ; получаемые с верхнего уровня –  $y_{1l}^t, l \in P_1$  и  $z_{4l}^t, l \in P_4$ , соответственно, для решения задачи координации на уровне 4PL системного интегратора и OEM. Функциональные подразделения не имеют своих собственных финансовых ресурсов и получают их только со стороны LLP системного интегратора и OEM, соответственно,  $y_{2l}^t, l \in P_2$  и  $z_{3l}^t, l \in P_3$ .

На втором уровне иерархии LLP системный интегратор являясь юридическим лицом и имея свои собственные активы, кроме решения задачи координации ФП, реализует свою деятельность на основе выполнения множества  $\bar{J}$  логистических функций, каждой из которых  $j \in \bar{J}$  соответствует множество ключевых показателей эффективности  $\bar{K}_j$  второго уровня иерархии. Как и на первом уровне для коррекции  $k$ -го ключевого показателя эффективности, где  $k \in \bar{K}_j$  вводятся дискретные переменные  $\bar{x}_{ka}^t$ , определяющие некоторый  $\alpha$ -вариант вклада финансовых ресурсов на  $t$ -м подпериоде планирования при условии

$$\bar{x}_{ka}^t \in \{0,1\}, \sum_{a \in \bar{A}_k} \bar{x}_{ka}^t = 1,$$

где  $\bar{A}_k$  – множество вариантов вклада ресурсов. 4PL системный интегратор, не имея своих собственных активов, решает только задачу координации 3PL провайдеров. Кроме этого, LLP системный интегратор в

отличие от 4PL системного интегратора в каждом  $t$ -м подпериоде планирования имеет свои собственные финансовые ресурсы  $\bar{R}^t$ , которые могут использоваться для решения задачи координации, так и для выполнения своих логистических функций.

На третьем уровне иерархии OEM координирует деятельность системных интеграторов второго уровня, на основе управляющих переменных  $\bar{z}_1^t$  и  $\bar{z}_2^t$ , а также множество  $P_3$  своих функциональных подразделений и множество  $P_4$  независимых 3PL провайдеров. Кроме этого реализует свою деятельность на основе множества  $\bar{J}$  логистических функций первого уровня иерархии, каждой из которых  $j \in \bar{J}$  соответствует множество ключевых показателей эффективности  $\bar{K}_j$ . Для решения выше перечисленных задач OEM на каждом  $t$ -м подпериоде имеет свои собственные базовые финансовые ресурсы  $\bar{R}^t$ . Как для первого и второго уровней иерархии вводятся управляющие дискретные переменные  $\bar{x}_{kl}^t$  соответствующие  $\alpha$ -варианту вклада ресурсов на  $t$ -м подпериоде планирования при условии

$$\bar{x}_{ka}^t \in \{0,1\}, \sum_{a \in \bar{A}_k} \bar{x}_{ka}^t = 1,$$

где  $\bar{A}_k$  – множество вариантов вклада ресурсов.

Исходя из введенных управляющих и координирующих переменных и понятия базовых финансовых ресурсов на  $t$ -м подпериоде планирования записываются ограничения, которые связывают между собой локальные задачи различных уровней иерархии.

На третьем уровне иерархии управления (уровень OEM)

$$\sum_{k=3}^4 \sum_{l \in P_k} z_{kl}^t + \sum_{k=1}^2 \bar{z}_k^t + \sum_{j \in \bar{J}} \sum_{k \in \bar{K}_j} \sum_{a \in \bar{A}_k} \bar{\delta}_a \bar{x}_{ka}^t \leq \bar{R}^t.$$

На втором уровне иерархии управления (уровень 4PL и LLP системных интеграторов)

$$\sum_{l \in P_1} y_{1l}^t \leq \bar{z}_1^t,$$

$$\sum_{l \in P_2} y_{2l}^t + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_j} \sum_{u \in A_k} \bar{\delta}_\alpha \bar{x}_{ku}^t \leq \bar{R}^t + \bar{z}_2^t.$$

На первом уровне иерархии управления (уровень ФП и ЗРЛ провайдеров)

$$\sum_{j \in J_1} \sum_{k \in K_j} \sum_{u \in A_k} \delta_\alpha x_{ku}^t \leq R_{sl}^t + y_{sl}^t, l \in P_s, s = 1, 2,$$

$$\sum_{j \in J_1} \sum_{k \in K_j} \sum_{u \in A_k} \delta_\alpha x_{ku}^t \leq R_{sl}^t + z_{sl}^t, l \in P_s, s = 3, 4$$

при условии, что  $R_{sl}^t = 0, l \in P_s, s = 2, 3$ . Параметры  $\delta_\alpha, \bar{\delta}_\alpha, \bar{\bar{\delta}}_\alpha$  определяют  $\alpha$ -вариант коррекции ключевых показателей эффективности, соответственно, на первом, втором и третьем уровнях иерархической системы организационного управления.

**Выводы.** Результаты исследований, приведенных выше, являются основой для формирования моделей и алгоритмов координации трехуровневой системы организационного управления распределенной логистической системой дистрибуции. Исходя из этого дальнейшие исследования будут посвящены решению следующих вопросов.

1. Формирование критериев функционирования отдельных участников логистической сети на различных уровнях иерархии управления.

2. Синтез локальных моделей и моделей межорганизационной и межфункциональной координации двухуровневых иерархических систем.

3. Формирование моделей и алгоритмов горизонтальной и вертикальной координации распределенных локальных задач.

4. Разработка технологии распределенного организационного управления на примере трехуровневой иерархической системы.

**Список литературы:** 1. Мировая экономика : под. ред. проф. А. С. Булатова – М. : Экономистъ, 2003. – 734 с. 2. Цвиркун А. Д. Оптимизация развития структур крупномасштабных систем (на примере энергетических систем) / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев //

М.: АН СССР. Институт проблем управления, 1987. – 52 с. 3. Росс С. И. Математическое моделирование и исследование национальной экономики / С. И. Росс. – СПб. : Изд-во СПб ГУ ИТМО, 2006. – 74 с. 4. Петров Э. Г. Территориально распределенные системы обслуживания / Э. Г. Петров, В. П. Писклакова, В. В. Бескоровайный. – К. : Техника, 1992. – 208 с. 5. Поспелов Г. С. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ / Г. С. Поспелов, В. А. Ириков, А. Е. Курилов. – М. : Наука, 1985. – 424 с. 6. Годлевский М. Д. Технология формирования системы организационного управления логистикой дистрибуции при стратегическом планировании / М. Д. Годлевский, А. А. Станкевич, И. М. Годлевский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – X. : Технологический центр, 2012. – № 4/3 (58). – С. 17–21. 7. Годлевский М. Д. Управление развитием иерархических распределенных систем (на примере транспорта) // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 5. – С. 99–115. 8. Михалевиц В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевиц, В. Л. Волкович. – М. : Наука, 1982. – 286 с. 9. Годлевский М. Д. Классификация иерархических систем управления и координации бизнес-процессов цепочек поставок / М. Д. Годлевский, А. А. Станкевич // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 9. – С. 18–23.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mirovaja jekonomika. Ed. A. S. Bulatova. M. : Jekonomist#, 2003. 734. Print. 2. Cvirkun, A. D. and V. K. Akinfiev. "Optimizacija razvitija struktur krupnomashtabnyh sistem (na primere jenergeticheskijh sistem)". M.: AN SSSR. Institut problem upravlenija. 1987. 52. 3. Ross, S. I. "Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie nacional'noj jekonomiki". SPb. : Izd-vo SPb GU ITMO, 2006. 74. Print. 4. Petrov, Je. G., V. P. Pisklakova and V. V. Beskorovajnyj. "Territorial'no raspredeleennyje sistemy obsluzhivanija". K. : Tehnika, 1992. 208. Print. 5. Pospelov, G. S., V. A. Irikov and A. E. Kurilov. "Procedury i algoritmy formirovanija kompleksnyh programm". M. : Nauka, 1985. 424. Print. 6. Godlevskij, M. D., A. A. Stankevich and I. M. Godlevskij. "Tehnologija formirovanija sistemy organizacionnogo upravlenija logistikoj distrib'ucii pri strategicheskom planirovanii". Vostochno-Evropeskij zhurnal peredovyh tehnologij. – Kh. : Tehnologicheskij centr, 2012. № 4/3 (58). 17–21. Print. 7. Godlevskij, M. D. "Upravlenie razvitiem ierarhicheskijh raspredeleennyh sistem (na primere transporta)". Problemy upravlenija i informatiki. 1995. № 5. 99–115. Print. 8. Mihalevich, V. S. and V. L. Volkovich. "Vychislitel'nye metody issledovanija i proektirovanija slozhnyh sistem". M. : Nauka, 1982. 286. Print. 9. Godlevskij, M. D. and A. A. Stankevich. "Klassifikacija ierarhicheskijh sistem upravlenija i koordinacii biznes-processov cepochek postavok". Visnyk NTU "KhPI". 2010. № 9. 18–23. Print.

Поступила (received) 15.12.2015

**Куценко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой системного анализа и управления; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: Kuzenko@kpi.kharkov.ua.

**Kutsenko Oleksandr Serhiyovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head the Department of Department of Analysis of the Systems and Control; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: Kuzenko@kpi.kharkov.ua.

**Годлевский Игорь Михайлович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры системного анализа и управления; тел.: (097) 305-00-50; e-mail: igorgodlevskiy@gmail.com.

**Godlevskiy Igor Myhailovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant the Department of Department of Analysis of the Systems and Control; тел.: (097) 305-00-50; e-mail: igorgodlevskiy@gmail.com.

**О. А. СІТНИКОВА, М. В. ПОЧЕБУТ**

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БАГАТОПРОФІЛЬНОЇ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

Розглянуто принципи підтримки прийняття рішень в системі сімейної медицини. Досліджено потоки даних, які використовуються для діагностики та профілактики захворювань. Запропоновано класифікацію ознак на основі аналізу даних електронної медичної картки пацієнта. Розроблено модель ідентифікації медико-біологічних параметрів на основі даних електронної медичної картки. Розроблено системну архітектуру та структуру бази даних клінічного моніторингу.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, медико-біологічні параметри, клінічний моніторинг, сімейна медицина, ідентифікація.

**Вступ.** Важливу роль у реалізації національної програми охорони здоров'я займають питання інформаційного моніторингу, аналізу даних, контролю, прийняття рішень. Останнім часом у медицині різко збільшився потік і обсяг інформації, в той час як спосіб її аналізу залишився без особливих змін. Аналіз інформації людиною став вузьким місцем, стримуючим як подальший розвиток медичної науки, так і практичне надання медичної допомоги.

Проблема організації збору, обробки та аналізу інформації, отриманої в процесі медичної діяльності, є в даний час однією з найбільш актуальних і невирішених проблем. Збір та аналіз інформації щодо стану здоров'я населення забезпечує основу для прийняття управлінських рішень керівниками галузі охорони здоров'я. Використання інформаційних комп'ютерних систем робить цей процес більш ефективним.

**Методи дослідження.** В даний час під підтримкою прийняття рішень (ППР) розуміють процес розпізнавання ситуації прийняття рішення і визначення мети, планування і генерації способів її реалізації, формування варіанту з використанням експертних знань і методів математичного програмування, моделювання наслідків прийнятих рішень для їх оцінки. Як рішення розглядається варіант тієї чи іншої дії, а вирішення ситуації прийняття рішення – знаходження варіанту рішення із застосуванням системи підтримки прийняття рішень (СППР), налаштованої на предметну область [1]. Для реалізації СППР використовують інформаційні технології, які забезпечують процес прийняття рішення на всіх його етапах.

При розробці СППР можна виділити наступні узагальнені етапи процесу прийняття рішень [2]:

- 1) ідентифікація інформаційного стану об'єкта.
- 2) діагностика ситуації прийняття рішень і визначення цілей.
- 3) планування дій.
- 4) формування варіантів рішень.

При прийнятті рішень в умовах невизначеності можна використовувати підходи, розглянуті в роботі [3], при нечіткій інформації – [4]. Підтримці прийняття рішень неструктурованих проблем присвячені роботи [4, 5]. Розробка СППР для задач багато профільної медичної допомоги у системі сімейної медицини повинна бути заснована на методологічних засадах створення та використання СППР.

**Огляд літератури.** Розглянемо, який математич-

ний апарат використовується для обробки даних з метою реалізації функцій управління в системах багато профільної медичної допомоги. Основою більшості інформаційних систем є облік статистичних даних [6]. Великі об'єми даних, що зберігаються в БД клінічного моніторингу, вимагають статистичної обробки. Попередній аналіз даних передбачає оцінку показників центру розподілу, варіації, форми розподілу. До статистичних методів обробки інформації належать такі види аналізу, як: дисперсійний, факторний, кластерний, регресійний, кореляційний [7]. Для виявлення прихованих знань, що зберігаються у масивах інформації, застосовуються методи Data Mining [8]. До методів Data Mining належать: базові методи, засновані на переборі [3]; нечітка логіка [4]; генетичні алгоритми [9]; нейронні мережі [10]. Таким чином, математичне забезпечення СППР представлено достатньо розгорнутим колом методів та підходів щодо збору, обробки та зберігання даних.

Як показав аналіз, в Україні існує успішний досвід впровадження інформаційних технологій в роботу лікаря сімейної медицини. Слід зазначити, що питання інформатизації сфери охорони здоров'я на рівні держави або регіону є достатньо актуальними напрямками досліджень [11, 12], але питання сімейної медицини зазвичай залишаються поза увагою. Апаратне та програмне забезпечення медичних СППР розглядаються окремо [13], що не дозволяє системно вирішувати задачі медичної діагностики. Це обумовлює напрямки досліджень з питань побудови комплексної системи сімейного лікаря.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності роботи сімейного лікаря шляхом створення, впровадження та використання системи підтримки прийняття рішень для багато профільної медичної допомоги.

Для досягнення поставленої мети необхідно: провести аналіз існуючих інформаційних систем в сфері сімейної медицини; дослідити потоки медичних даних щодо діагностики та профілактики захворювань; розробити модель ідентифікації пацієнтів в системі сімейної медицини; визначити структуру БД; розробити архітектуру СППР та моделі використання з урахуванням задач багато профільної медичної допомоги.

**Результати дослідження.** Вирішення головної задачі сімейного лікаря – профілактика та запро-

вадження захворювань, а також діагностика та лікування у разі хвороби, – не можливо без обробки первинних даних про стан здоров'я пацієнтів та медичних даних щодо результатів наукових досліджень. Вивчення захворюваності проводиться за загальноприйнятою схемою статистичних досліджень із певною послідовністю етапів [11]. Це вимагає якісної інформації та системи статистичного спостереження за станом здоров'я пацієнтів.

Джерелами інформації даних щодо захворювань служать: 1) медичні відомості про звернення за медичною допомогою; 2) дані медичних оглядів; 3) медичні картки пацієнтів. Електронна медична картка пацієнта – ключове джерело інформації для обробки в СППР. У картці подано хронологію відвідувань пацієнтів і призначень, є історія розвитку різних захворювань (анамнез), є загальна інформація про пацієнта, результати його аналізів тощо. З представленої інформації можна витягти такі важливі відомості, як дати профілактичних оглядів, виявити фактори ризику для захворювань, оцінити результати лікування.

Електронна медична картка повинна включати в себе наступні дані [13]:

- 1) демографічні дані, дані фізичних оглядів, оцінки, результати тестування і результати процедур протягом усього життя пацієнта;
- 2) записи про лікування, включаючи всі медичні призначення, сестринські втручання, терапію, зауваження про хід лікування і стан хворого;
- 3) подальше лікування, включаючи призначення пацієнту, плановий догляд та інше.

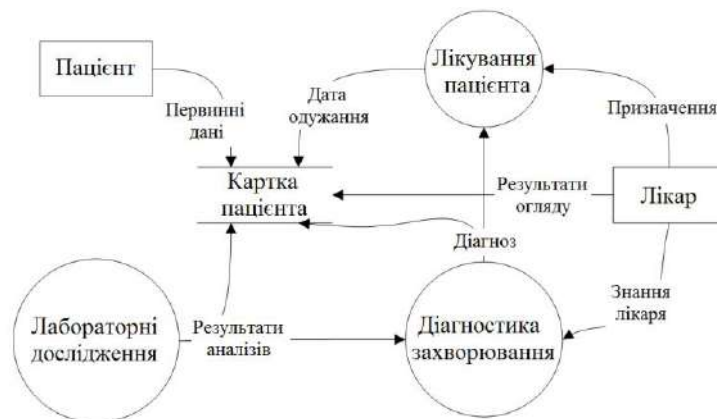


Рис. 1 – Діаграма потоків даних процесу збору медичних даних пацієнта

Враховуючи особливості медичних даних та їх потоків, можна побудувати модель даних (рис. 2).

Аналізуючи процедури і процеси, які характеризують роботу сімейного доктора, можна зробити висновок, що медична картка пацієнта – ключове джерело інформації для обробки. У медичній картці подано хронологію відвідувань пацієнтів і призначень, є історія розвитку різних захворювань (анамнез), є загальна інформація про хворого, результати аналізів. З представленої інформації можна витягти такі важливі відомості, як дати профілактичних оглядів, виявити фактори ризику для захворювань, оцінити результати лікування.

Для підтримки прийняття рішень сімейним лікарем необхідно зберігати інформацію у структурованому вигляді, тобто у БД. Для побудови БД виділимо такі джерела інформації: пацієнти та їхні анамнези; результати аналізів пацієнтів; результати різних медичних процедур, наприклад, флюорографія, електрокардіографія, рентген; мережа інтернет; медична література; безпосередньо сімейний лікар, який вносить в картку нові дані про пацієнтів і їхні сім'ї у зв'язку з різними ситуаціями. Джерелами інформації для бази медичних знань є також лікарі-експерти в тій чи іншій галузі медичних знань, спеціальна довідкова медична література, а також результати наукових досліджень, що мають відношення до медицини.

Процес надання амбулаторно-поліклінічної допомоги пацієнту, в результаті якого збираються медико-діагностичні дані, можна представити у вигляді діаграми потоків даних (рис. 1). Пацієнт приходить на первинний огляд, на якому вимірюються основні біометричні показники, результати заносяться до картки. Також пацієнт, зазвичай, заповнює анкету, за допомогою якої можна з'ясувати шкідливі звички, перенесені захворювання, умови життя. Наприклад, для виявлення у пацієнтів захворювань серцево-судинної системи, необхідно заповнити такі дані: стать, вік, зріст, наявність менопаузи (для жінок), наявність цукрового діабету, несприятлива спадковість в плані серцевих захворювань, підвищене споживання солі, наявність ожиріння, зловживання алкоголем, низька фізична активність, наявність стресів, куріння, соціально-економічне становище, споживання висококалорійних продуктів тощо.

Якщо пацієнт звернувся за допомогою через те, що він захворів, то хворому проводиться огляд, лабораторні дослідження, далі лікар в картку заносить результати аналізів, поставлений діагноз, призначене лікування, дати звернення, що проводяться медичних процедур і одужання пацієнта. Лабораторні дослідження включають в себе два види процедур: перша – різні аналізи крові, сечі і т. д., друга – проведення приладно-комп'ютерних досліджень – УЗД, ЕКГ, рентген, флюорографія та ін. В результаті таких досліджень з'ясовуються різні показники стану організму. Ці індикатори здоров'я пацієнта бувають в числовому вигляді, а можуть мати якісну природу.

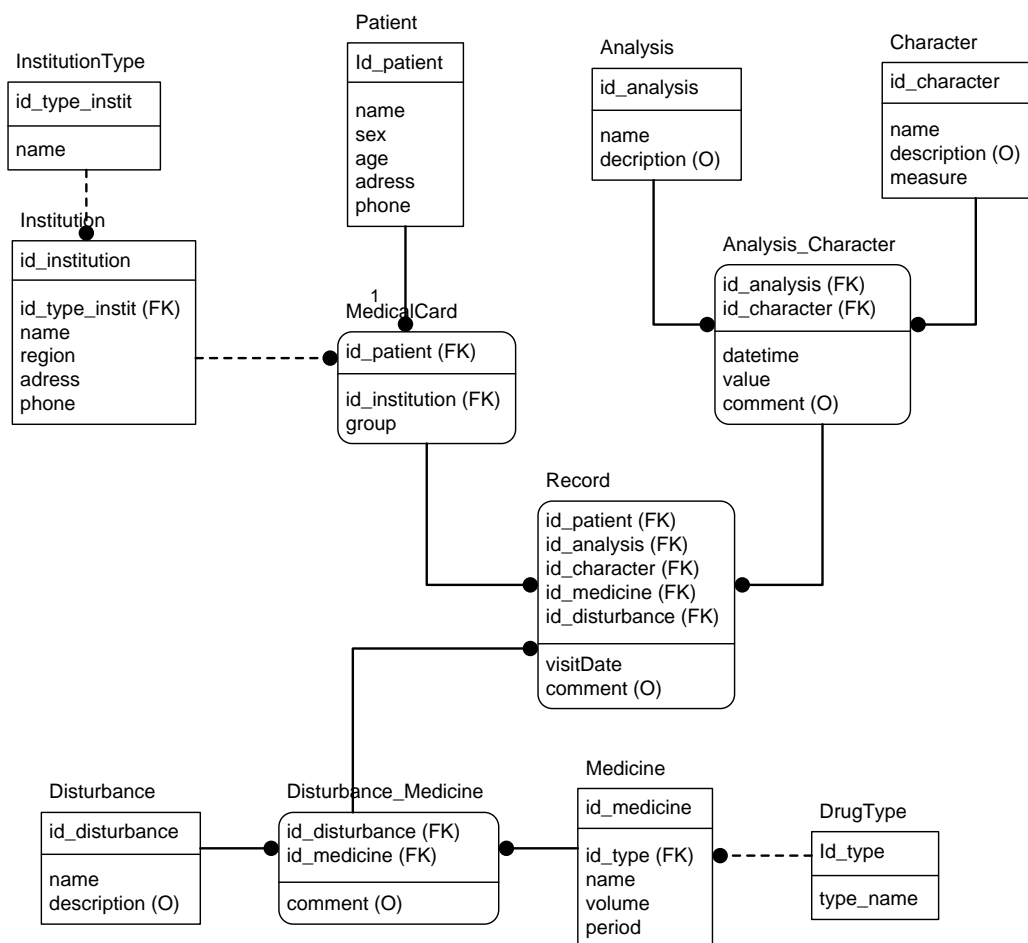


Рис. 2 – Інфологічна модель даних

Наприклад, щоб виявити інфаркт міокарда (ІМ) необхідні такі діагностичні процедури, як [14]: проведення ЕКГ, проведення клінічного та біохімічного аналізів крові. ЕКГ дасть такі параметри: форма і розміри зубця R, наявність патологічного зубця Q, висота підйому сегмента ST вище ізолінії або депресія сегмента ST, наявність негативного зубця T. У клінічному аналізі крові основними будуть такі показники як кількість лейкоцитів і швидкість осідання еритроцитів. Біохімічний аналіз дозволить судити про наявність ІМ за такими параметрами: підвищений рівня фібриногену, рівень тропоніну I, лактатдегідрогенази сироватки, рівень креатин-фосфокінази, рівень аспаратамінотрансферази. Після обробки результатів лабораторних досліджень лікар може зробити висновки про відхилення у здоров'ї, застосовуючи свої знання, досвід, відповідну медичну літературу. Лікар ставить діагноз і призначає лікування, яке заноситься в картку у вигляді переліку назв лікарських препаратів та схем їх застосування, а також рекомендованих медичних процедур.

Ще одним важливим завданням сімейного лікаря є задача планування і проведення заходів, спрямованих на профілактику здоров'я пацієнтів. Для віднесення пацієнта до групи ризику якогось захворювання або до групи з нормальним рівнем здоров'я, необхідно проводити спеціальні дослідження, наприклад, в рамках процесу диспансеризації. Диспансеризація дає

можливість виявити захворювання на ранній стадії його розвитку, що служить передумовою успішного лікування [14]. Наприклад, для виявлення захворювань серцево-судинної системи пацієнтові до сорока років потрібно робити ЕКГ раз на п'ять років, після сорока років – раз на рік. Результати проведення диспансеризації також відображаються у медичних картках пацієнтів.

Медичні дані мають досить різну природу і являють собою неоднозначну інформацію про процеси, що протікають в організмі пацієнта. Всі дані можна розділити на чотири основні групи: дати, текстові дані, якісні дані і кількісні дані. Дати відіграють важливу роль у хронології анамнезу, дають можливість оцінити динаміку розвитку захворювань, результати лікування та ін. Текстові дані – це неструктуровані дані, що представляють собою опис скарг, результати огляду та ін. Цей вид даних сильно залежить від лікаря: чи вважає він необхідним записати ту чи іншу інформацію в картку, чи звернув увагу на будь-які скарги пацієнта або взагалі щось забув відзначити.

Кількісні дані можуть бути безперервними або дискретними. Велика кількість інформації про пацієнта представлено у вигляді якісних даних. Вони бувають дихотомічними – є тільки два варіанти відповіді, наприклад, стать або наявність або відсутність якогось захворювання, і багатоваріантними, які, в свою чергу, діляться на номінальні і порядкові. Номінальні



– це дані, що відображають умовні коди щодо невимірюваних категорій, наприклад, коди діагнозу, тяжкість стану (легке ушкодження, середнє, сильне). Порядкові дані – це такий вид якісних даних, значення яких представлені у вигляді шкали або сукупності категорій, наприклад, стадії якого-небудь захворювання, стадії лікування, ступеня серцевої недостатності.

Таким чином, для побудови БД необхідно провести аналіз даних, що зберігаються у медичних картках та розробити систему показників, за значенням яких можна вирішувати медичні завдання в системі сімейної медицини. Розглянемо у якості прикладу інформацію, необхідну для прийняття рішень про наявність серцево-судинних захворювань. Визначимо наступні групи ознак: 1) первинні ознаки – це ознаки, які є у будь-якого пацієнта та які визначаються при першому звертанні; 2) анамнез – це група ознак, які характеризують наявні діагнози та історію хвороби, а також мають суттєве значення як фактори ризику виявлення захворювань; 3) діагностичні ознаки – це показники, які визначаються на основі лабораторно-діагностичних процедур; 4) оглядові ознаки – це ознаки, які може встановити лікар тільки в процесі огляду.

Слід відзначити, що остання група ознак впливає на прийняття діагностичного рішення у двох випадках: по-перше, безпосередньо при зверненні хворого; по-друге, в результаті аналізу динаміки змін показників при довготривалому спостереженні. Крім цього, діагностичні ознаки також мають важливе значення лише на момент проведення діагностичних заходів. Тобто дані першої та другої групи можуть бути використані для визначення несприятливих факторів, а ознаки третьої та четвертої групи – для діагностики захворювань. Важливо, що дані щодо перших груп ознак мають достатньо тривалий період актуальності на відміну від ознак останніх груп, актуальність яких може вимірюватись в межах лише декількох годин. З іншого боку, автоматизація збору діагностичних ознак та структуроване зберігання надає можливість аналізувати динаміку показників та надає додаткову інформацію для прийняття медичних рішень, що є важливою складовою медичної СППР.

Знання, на основі яких сімейний лікар приймає рішення, можна формалізувати за допомогою методів теорії інтелекту, зокрема методу компараторної ідентифікації [15]. Компаратор реалізує предикат  $K(y_1, y_2, \dots, y_m) = t$ , що відповідає відношенню  $K$ , в якому знаходяться вхідні сигнали  $y_1, y_2, \dots, y_m$ . При цьому  $t$  – це двійкова реакція компаратора,  $t \in \Sigma, \Sigma = \{1, 0\}$ . До входів компаратора підключені своїми виходами ідентифіковані інформаційні процеси  $r_1, r_2, \dots, r_m$ . Інформаційні процеси представляють механізми сприйняття вхідних фізичних сигналів  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . Компаратор разом із підключеними до нього інформаційними процесами називається ідентифікованим об'єктом.

Аналіз даних необхідно проводити у декілька етапів. Спочатку треба проаналізувати дані, які знаходяться у медичній картці пацієнта та визначити

групу, відповідно до якої можна застосовувати певні рекомендації щодо ризиків розвитку захворювань. У якості критеріїв групування виступають такі ознаки як стать, вік, несприятлива спадковість або наявність певних діагнозів. Визначимо цю групу ознак на прикладі аналізу серцево-судинних захворювань. Будемо називати цю групу ознак первинною. Таким чином, на першому етапі здійснюється первинна обробка даних медичної картки.

Для формалізації задачі введемо ознаки, за якими можна ідентифікувати групи пацієнтів відповідно до даних медичних карт. Позначимо:  $x_1$  – стать; змінна  $x_1$  може приймати два значення  $x_1^c$  – чоловіча,  $x_1^j$  – жіноча. При цьому виконуються наступні умови:  $x_1^c \vee x_1^j = 1$  та  $x_1^c \wedge x_1^j = 0$  для кожного пацієнта. Нехай  $x_2$  – вік. Припустимо, що сімейний лікар виділяє наступні вікові інтервали: діти ( $x_2^d$ ), підлітки ( $x_2^l$ ), молодь ( $x_2^m$ ), дорослі ( $x_2^{op}$ ) та зрілі ( $x_2^z$ ). Тоді можна записати, що  $x_2^d \vee x_2^l \vee x_2^m \vee x_2^{op} \vee x_2^z = 1$ . Як показали дослідження [14], факторами ризику для розвитку захворювань є несприятлива спадковість та наявність певних діагнозів. Наприклад, для серцево-судинних захворювань до таких факторів ризику можна віднести цукровий діабет, менопаузу тощо. Нехай  $x_3$  – несприятлива спадковість щодо серцево-судинних захворювань ( $x_3^e$  – існує запис у медичній картці про несприятливу спадковість,  $x_3^{немає}$  – запису немає). Тоді  $x_3^e \vee x_3^{немає} = 1$ . Аналогічно введемо ознаки  $x_4$  – наявність цукрового діабету,  $x_5$  – менопауза (у жінок),  $x_6$  – перенесена хламідійна інфекція. Враховуючи, що сімейний лікар спілкується з родиною, надає медичну допомогу та володіє інформацією щодо певних аспектів приватного життя своїх пацієнтів, будемо вважати, що заповнення медичної картки за наступними ознаками не є складною процедурою. Тому введемо до розгляду групу ознак, які характеризують образ життя пацієнта та є латентними факторами ризику для розвитку багатьох серйозних захворювань. Нехай  $x_7$  – куріння,  $x_8$  – ожиріння,  $x_9$  – гіподинамія,  $x_{10}$  – зловживання сіллю,  $x_{11}$  – наявність стресів,  $x_{12}$  – вживання висококалорійних продуктів,  $x_{13}$  – вживання алкоголю. Відповідно до значень первинних ознак можна сформулювати групи пацієнтів, що мають однакові рекомендації щодо ризиків розвитку серцево-судинних захворювань.

Визначимо класи пацієнтів за введеними ознаками. Спочатку розглянемо дітей на прикладі хлопчиків. Якщо прийняти до уваги, що такі ознаки як  $x_5, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{13}$  для всіх дітей завжди мають значення «немає», то можна сформувати групу з наступними ознаками:

$$D_1 = x_1^c x_2^d x_3^{немає} x_4^{немає} x_5^{немає} x_7^{немає} x_8^{немає} x_{10}^{немає} x_{11}^{немає} x_{13}^{немає}.$$

Тоді інші ознаки визначають відповідні групи для хлопчиків. Отримаємо наступні рівняння:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= D_1 x_3^{\text{немає}} x_4^{\text{немає}} x_6^{\text{немає}} x_9^{\text{немає}} x_{12}^{\text{немає}}, \\
 S_2 &= D_1 x_3^c x_4^{\text{немає}} x_6^{\text{немає}} x_9^{\text{немає}} x_{12}^{\text{немає}}, \\
 S_3 &= D_1 x_3^c x_4^c x_6^{\text{немає}} x_9^{\text{немає}} x_{12}^{\text{немає}}, \\
 S_4 &= D_1 x_3^c x_4^c x_6^c x_9^{\text{немає}} x_{12}^{\text{немає}}, \\
 &\dots \\
 S_{32} &= D_1 x_3^c x_4^c x_6^c x_9^c x_{12}^c.
 \end{aligned}$$

Як показує приклад з хлопчиками, визначення груп пацієнтів щодо отримання рекомендацій про розвиток серцево-судинних захворювань, потребує введення додаткових ознак класифікації. Наприклад, можна об'єднати всіх дітей, оскільки стать у даному віці не впливає на розвиток захворювання. Таким чином, первинна обробка даних медичної картки базується на вирішенні задачі ідентифікації класів рекомендацій. Відповідно до кожного класу визначаються: перелік обстежень, діагностичних процедур та превентивних заходів.

На рис. 3 представлена запропонована архітектура інформаційної системи клінічного моніторингу.

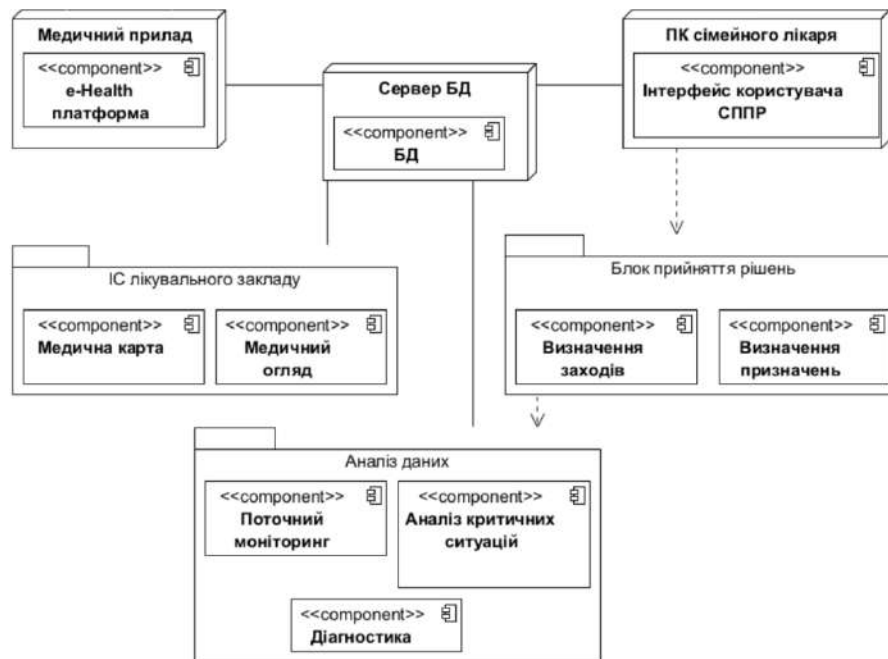


Рис. 3 – Архітектура СППР

Таким чином, підтримка прийняття медичних рішень в системі сімейного лікаря основана на створенні та використанні структурованої медичної інформації про пацієнтів, а також на механізмах обробки медичних даних задля визначення рекомендацій. Медико-діагностичні дані збираються та зберігаються в БД шляхом обробки інформації, яка зберігається в електронних медичних картках, визначається сімейним лікарем в процесі огляду, або отримується внаслідок проведення певних лабораторно-діагностичних процедур.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Проведено аналіз існуючих інформаційних систем в медицині, зокрема в сімейній медицині, в результаті якого визначено необхідність розробки СППР для багатопрофільної медичної допомоги в системі сімейної медицини, яка дозволяє визначити рекомендації на основі інтелектуального аналізу медичних даних.

2. Досліджено особливості потоків медичних даних в системі сімейної медицини, що дозволило провести класифікацію ознак для прийняття рішень та визначити засоби їхнього збору та зберігання.

3. Розроблено модель ідентифікації медичних ознак на основі даних, що зберігаються в медичній картці пацієнта, що надає базу для формування рекомендаційних механізмів та визначення ризиків розвитку захворювань.

4. Розроблено основні моделі використання СППР, визначено цільових користувачів та запропоновано багаторівневу архітектуру, що дозволить реалізувати збір медичних даних, їх зберігання та подальшу обробку для реалізації цілей та задач багатопрофільної медичної допомоги.

**Список літератури:** 1. Попов А. Л. Системы поддержки принятия решений: Учебное пособие / А. Л. Попов. – Екатеринбург : Урал. гос. ун-т, 2008. – 80 с. 2. Decision Support Systems: Issues and Challenges / Ed. by G. Fick and R. H. Sprague. – Oxford : Pergamon Press, 1980. – 189 p. 3. Черноморов Г. А. Теория принятия решений: Учебное пособие / Г. А. Черноморов. – Новочеркасск : Рос. гос. техн. ун-т, Ред. журнала «Изв. вузов. Электромеханика», 2002. – 276 с. 4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун, В. Б. Силов, В. Б. Тарасов. / Под ред. Поспелова Д. А. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с. 5. Turban E. Decision support and expert systems: management support systems / E. Turban. – Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1995. – 887 p. 6. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник / И. Гайдышев. – СПб. : Питер, 2001. – 752 с.

7. Ким Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 216 с. 8. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 384 с. 9. Melanie M. An introduction to genetic algorithms / M. Melanie. – London: A Bradford Book, The MIT Press, 1999. – 158 p. 10. Gallant S. Neural Network Learning and Expert Systems / S. Gallant. Cambridge, MA: The MIT Press, 1993. – 364 p. 11. Інформаційні технології в охороні здоров'я і практичній медицині / За ред. О. П. Мінцера. – К. : Вища школа, 2003. – 350 с. 12. Качмар В. О. Медичні інформаційні системи – стан розвитку в Україні / В. О. Качмар // Український журнал телемедицини та медичної телематики. – 2010. – № 8(1). – С. 12–17. 13. Знаменська М. А. Інформатизація закладів охорони здоров'я як основа ефективних комунікацій в системі охорони здоров'я / М. А. Знаменська, Г. О. Слабкий // Медична інформатика та інженерія. – 2015. – № 2. – С. 85–88. 14. Topol E. J. Textbook of cardiovascular medicine / E. J. Topol. – Lippincott Williams & Wilkins, 2002. – 2237 p. 15. Бондаренко М. Ф. Мозгоподобные структуры: Справочное пособие. Том первый / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко / Под ред. акад. НАН Украины И. В. Сергиенко. – К. : Наукова думка, 2011. – 460 с.

Novocherkassk: Ros. gos. tehn. un-t., Red. zhurnal "Izv. vuzov. Elektromekhanika", 2002. Print. 4. Averkin, A. N., et al. *Nechetkie mnozhestva v modelyah upravleniya i iskusstvennogo intellekta*. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. Print. 5. Turban, E. *Decision support and expert systems: management support systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1995. Print. 6. Gaydyshchev, I. *Analiz i obrabotka dannyh: spetsialnyy spravochnik*. St. Petersburg: Piter, 2001. Print. 7. Kim, Dzh.-O., Ch. U. Myuller, and U. R. Klekka. *Faktornyiy, diskriminantnyiy i klasternyy analiz*. Moscow: Finansyi i statistika, 1989. Print. 8. Barsegyan, A. A., et al. *Tehnologii analiza dannyh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP*. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2007. Print. 9. Melanie, M. *An introduction to genetic algorithms*. London: A Bradford Book, The MIT Press, 1999. Print. 10. Gallant, S. *Neural Network Learning and Expert Systems*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1993. Print. 11. Mintsera, O. P., ed. *Informatsiyi tehnologiyi v ohoroni zdorov'ya i praktichniy meditsini*. Kiev: Vischa shkola, 2003. Print. 12. Kachmar, V. O. "Medichni informatsiyi sistemi – stan rozvitku v Ukraini". *Ukrayinskiy zhurnal teleditsini ta medichnoyi telematiki*. No. 8.1. 2010. 12–17. Print. 13. Znamenska, M. A., and G. O. Slabkiy. "Informatizatsiya zakladiv ohoroni zdorov'ya yak osnova effektivnih komunikatsiy v sistemi ohoroni zdorov'ya". *Medichna Informatika ta Inzheneriya*. No. 2. 2015. 85–88. Print. 14. Topol, E. J. *Textbook of cardiovascular medicine*. Lippincott Williams & Wilkins, 2002. Print. 15. Bondarenko, M. F., and Yu. P. Shabanov-Kushnarenko, *Mozgopodobnyie struktury: Spravochnoe posobie. Vol.1* Kiev: Naukova dumka, 2011. Print.

**Bibliography (transliterated):** 1. Popov, A. L. *Sistemyi podderzhki prinyatiya resheniy: Uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: Ural. gos. un-t, 2008. Print. 2. Fick, G., and R. H. Sprague, eds. *Decision Support Systems: Issues and Challenges*. Oxford: Pergamon Press, 1980. Print. 3. Chernomorov, G. A. *Teoriya prinyatiya resheniy: Uchebnoe posobie*.

Надійшло (received) 05.11.2015

**Сітнікова Оксана Олександрівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри обчислювальної техніки та програмування; тел.: (098) 960–89-39; e-mail: oasitnikova@mail.ua.

**Sitnikova Oksana Oleksandrivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of hardware and programming; tel.: (098) 960-89-39; e-mail: oasitnikova@mail.ua.

**Почебут Максим Валентинович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; тел.: (098) 558-63-95; e-mail: pochebut.maksim@mail.ru.

**Pochebut Maxim Valentinovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National University of Radioelectronics, Associate Professor at the Department of software engineering; tel.: (098) 558-63-95; e-mail: pochebut.maksim@mail.ru.

УДК 519.2: 658.5.011

**С. В. ШЕВЧЕНКО, А. А. ЭГОЯНЦ**

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Предлагаются методы формирования планов производства электроэнергии с учетом задаваемой динамики изменения состояния основных производственных ресурсов энергосистемы. На основе применения разработанных математических моделей и алгоритмов управления состоянием энергоблоков энергосистемы определяются распределения объемов генерации и поставок электроэнергии, а также формируются графики работы отдельных энергоблоков, обеспечивающих производство электроэнергии в соответствии с требуемыми объемами потребления. Результаты работы могут быть использованы в составе задач функциональной структуры подсистемы диспетчерского управления энергосистемой.

**Ключевые слова:** электроэнергия, энергосистема, изменение состояний, критерий, модель, оптимизация, алгоритм, анализ.

**Введение.** Переход к рыночным отношениям в сфере производства, поставок, транспортировки и потребления электроэнергии приводит к необходимости рассмотреть ряд новых задач в управлении, решение которых позволит создать условия для повышения эффективности в электроэнергетике. Это задачи формирования процедур управления рыночными механизмами регулирования соотношений спроса и пред-

ложений, задачи совершенствования решения задач диспетчерского управления, задачи перспективного планирования и др. Подобные вопросы рассматривались в работах [1–4]. Однако задачи формирования целостной стратегии организации эффективного управления в электроэнергетике рассмотрены не полностью. Работа посвящена совершенствованию управления на базовом уровне – на уровне управления

объемами генерации электроэнергии отдельными энергоблоками генерирующих предприятий в составе энергосистемы.

**Постановка задачи.** В соответствии с условиями рыночной экономики в электроэнергетике особенно острыми становятся вопросы поддержки эффективности производства электроэнергии, ее распределения и потребления. Данные долгосрочных, среднесрочных, краткосрочных контрактов и контрактов, заключенных по результатам торгов на балансирующем рынке, а также оперативный учет состояний

субъектов производства, поставок и распределения электроэнергии могут быть использованы для повышения эффективности текущего планирования, распределения объемов производства электроэнергии между генерирующими компаниями, их энергоблоками в виде формирования эффективного плана-графика нагрузки для каждого энергоблока.

В целом, все процессы планирования и оперативного управления должны увязываться в единую систему в соответствии с принимаемой иерархией процессов управления, рис. 1.

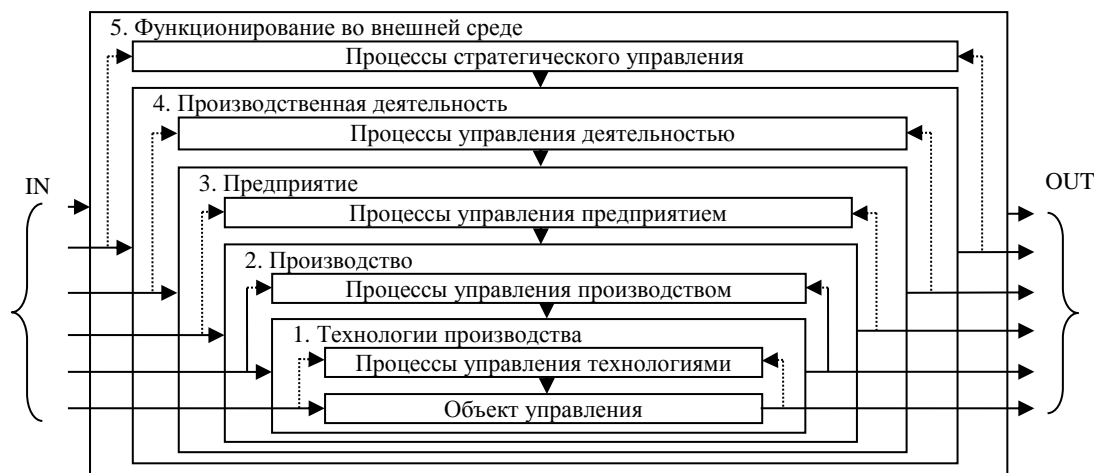


Рис. 1 – Иерархия процессов управления

Для решения выделенных задач должны быть собраны данные о состоянии и возможностях маневрирования объемами производства всех генерирующих и поставляющих компаний на всех уровнях, а также оценки задержек реализации основных функций, связанных с производством и потреблением конечной продукции.

Учитывая различные динамические характеристики указанных процессов и выполняющих их субъектов производственной деятельности, а также текущие и плановые состояния, данные задачи должны рассматриваться в динамике изменений всех перечисленных факторов и показателей.

Решения в такой постановке позволяют формировать планы производства и поставок электроэнергии на следующий промежуток времени (например, сутки), которые максимально соответствуют реальным обстоятельствам и обладают более высокой эффективностью с позиций использования доступных ресурсов.

Основным критерием при этом следует считать минимальные затраты на обеспечение сбалансированного и окупаемого спроса экономически рентабельным производством и поставками электроэнергии.

Предлагаемые ранее и используемые процедуры в составе принятых методик не учитывают динамические особенности источников и производителей потребляемой электроэнергии, применение которых в последующих схемах управления может стать ключевым фактором для повышения эффективности функционирования всей энергосистемы.

Учет динамических свойств объекта управления оказывает существенное влияние на эффективность процессов управления [5]. Будем считать, что состояние объекта управления описывается вектором  $Q(t_i)$ , компоненты которого представляют собой числовые и качественные характеристики состояния объекта управления в момент времени  $t_i \in T$ . Переход объекта управления в состояние  $Q(t_n)$  в момент времени  $t_n$ ,  $t_n \geq t_i$ , может быть следствием воздействия управляющих параметров, образующих совокупность векторов  $Y = \{Y(t_i)\}$ , и результатом выполнения существующих процессов в составе системы [6]. Переход может быть представлен в виде:

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t_i), Y), \quad (1)$$

где  $F(\ )$  – построенная функция, идентифицирующая изменение состояния объекта управления под воздействием результатов выполнения выделенных процессов, учитываемых факторов и управляющих значений.

В таком случае, целью оптимального управления можно считать формирование временной последовательности таких значений управляющих параметров, которые обеспечивают переход объекта управления в требуемое состояние с учетом значений выбранного критерия оптимальности. Процедуры оптимизации управления могут быть построены с использованием векторного критерия оптимальности или с построе-

нием множества эффективных решений и применением процедур многокритериальной оптимизации в зависимости от содержания и согласованности выбранных критериев.

Введем следующие обозначения.

Пусть  $\Omega(t_i)$  – множество, определяющие целевые состояния объекта управления на момент времени принятия решения  $t_i \in T$ ;  $R_0(t_i)$  – доступные ресурсы для перевода объекта управления в целевое состояние;  $Y_0(t_i)$  – множество допустимых значений управляющих параметров.

Тогда, если задать в качестве критерия оптимальности вектор  $E(Q(t_n), Q(t_i), Y)$ , компоненты которого определяют характеристики перехода объекта управления в новое целевое состояние, то рассматриваемая задача оптимального управления может быть представлена в следующем виде.

Для заданного момента времени  $t_i \in T$  найти совокупность векторов  $Y = \{Y(t_i)\}$ , обеспечивающих

$$E(Q(t_n), Q(t_i), Y) \rightarrow opt \quad (2)$$

при ограничениях

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t_i), Y), \quad (3)$$

$$Q(t_n) \in \Omega(t_i), \quad (4)$$

$$R(Q(t_n), Q(t_i), Y) \leq R_0(t_i), \quad (5)$$

$$Y(t_i) \in Y_0(t_i). \quad (6)$$

Здесь функция  $R(Q(t_n), Q(t_i), Y)$  определяет требуемые ресурсы для перехода объекта управления в целевое состояние.

Применение рассматриваемой концепции управления производственными системами было рассмотрено на примере организации управления в электроэнергетической системе, нижний уровень которой предполагает формирование графика нагрузки энергоблоков для производства электро-энергии в соответствии с заданными объемами ее потребления за некоторый период.

Основным критерием оптимальности был выбран минимум суммарных затрат. Данная задача может

быть представлена задачей частично-целочисленного линейного программирования. Аналогичные задачи рассмотрены в работе [6].

#### Пример расчетов и анализ полученных результатов

Применение рассматриваемой концепции управления состоянием энергоблоков было рассмотрено на условном примере, позволяющем создавать процессы управления для некоторой условной ТЭС в составе электроэнергетической системы, нижний уровень управления которой предусматривает формирование графика производства, поставок и распределения электроэнергии в соответствии с заданным уровнем спроса. Данные спроса представлены в часовом разрезе следующих суток и могут быть результатом всех уровней планирования, включая результаты долгосрочного, краткосрочного, текущего планирования и данные торгов балансирующем рынке.

Для тестовых расчетов были использованы следующие данные о спросе и характеристиках энерго-системы, приведенные в табл. 1–2.

Таблица 1 – Спрос на электроэнергию в течение суток

Время	Объем, МВт*ча с	Время	Объем, МВт*ча с	Время	Объем, МВт*ча с
00:00	900	08:00	1800	16:00	1600
01:00	1050	09:00	1900	17:00	1500
02:00	1100	10:00	1950	18:00	1500
03:00	1200	11:00	1900	19:00	1400
04:00	1500	12:00	1900	20:00	1200
05:00	1600	13:00	1900	21:00	1100
06:00	1650	14:00	1850	22:00	1000
07:00	1700	15:00	1700	23:00	950

В табл. 1 указаны рассматриваемые объемы спроса электроэнергии, которые должны быть обеспечены энергосистемой на основании договорных обязательств и используемые для формирования графиков нагрузки энергоблоков в соответствии с принятыми правилами учета в часовом разрезе для каждых суток.

В табл. 2 приведены значения характеристик энергоблоков ТЭС, используемые для тестирования предлагаемых процедур маневрирования мощностью с учетом динамических характеристик энергоблоков.

Таблица 2 – Характеристики энергоблоков ТЭС

Характеристика	Энергоблоки ТЭС			
	1-й э/бл.	2-й э/бл.	3-й э/бл.	4-й э/бл.
Мин. мощность, МВт	200	250	200	250
Макс. мощность, МВт	500	550	500	450
Текущая мощность, МВт	0	250	300	0
Цена, Грн./МВт*час.	522	450	510	550
Время пуска, час.	1	2	3	4
Время останова, час.	4	3	2	1
Стоимость пуска, грн.	10000	12000	12000	13000
Стоимость останова, грн.	800	500	400	500
Расход топлива, т/МВт	371.3	372.6	373.7	374.2
Начальное состояние	0	1	1	0

Результаты решения задачи оптимизации распределения объемов производства по энергоблокам с критерием минимум затрат на пуск, производство и поставку электроэнергии и учетом заданного начального состояния энергоблоков представлены в виде

нагрузки энергоблоков для каждого часа в течение суток.

Графики изменения и значение целевой функции для данных табл. 2 представлены на рис. 1.

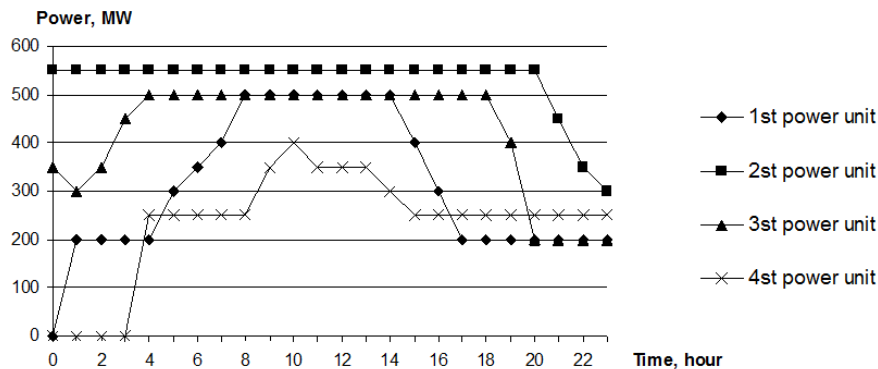


Рис. 2 – Графики нагрузки энергоблоков.  
Суммарная стоимость: 17837900 грн.

Как видно из полученных планов-графиков производства (см. рис. 2), 2-й и 3-й блоки находятся в рабочем состоянии и производят электроэнергию в соответствии с уровнем, определенным по решению указанной задачи. При этом 1-й блок включается в момент времени  $t = 0$  и переходит в рабочее состояние при  $t = 1$  в соответствии с его характеристиками, см. табл. 2.

Отметим, что представленные результаты решения рассматриваемой задачи маневрирования мощностью энергоблоков энергосистемы с учетом динамики изменения их состояний, могут быть использованы для формирования непосредственных управляющих воздействий, подаваемых на генерирующее оборудование, в контуре систем автоматизированного диспетчерского управления (АСДУ), создавая условия для образования «умных сетей» (Smart-grid) [4, 7, 8].

Иллюстрация динамики процессов включения и перехода в рабочее состояние для 1-го блока показаны на диаграммах, приведенных на рис. 3.

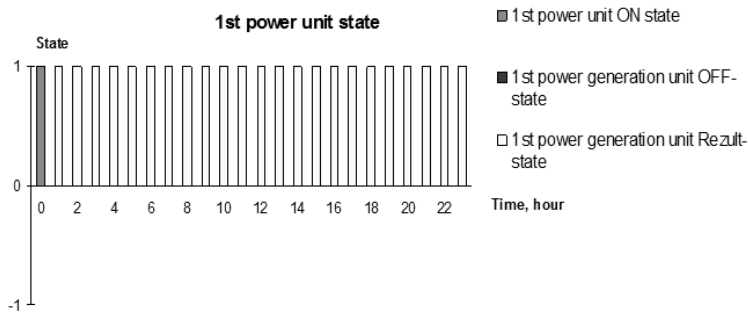


Рис. 3 –График изменения состояния 1-го энергоблока.

Изменения состояний 4-го энергоблока отражены в виде временных диаграмм на рис. 4.

На диаграммах видно, что переход из состояния включения блока в рабочее состояние происходит спустя 4 часа.

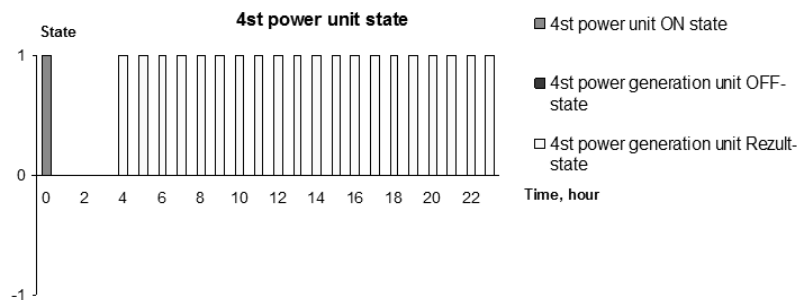


Рис. 4 –График изменения состояния 4-го энергоблока.

Переход 4-го блока в рабочее состояние осуществляется в соответствии с характеристикой длительности пуска согласно данным табл. 2.

Для демонстрации учета влияния динамических свойств энергоблоков изменим исходные данные задачи в виде значений времени пуска и останова блоков в соответствии с табл. 3.

Согласно новым результатам решения задачи, рис. 5, чтобы удовлетворить спрос при заданных условиях эксплуатации, следует использовать 1-й и

4-й энергоблоки, которые были выключены в начале рассматриваемого периода.

Таблица 3 – Изменения данных времени пуска и останова ТЭС

Характеристика	Энергоблоки ТЭС			
	1-й э/бл.	2-й э/бл.	3-й э/бл.	4-й э/бл.
Время пуска, час.	4	3	2	1
Время останова, час.	1	2	3	4

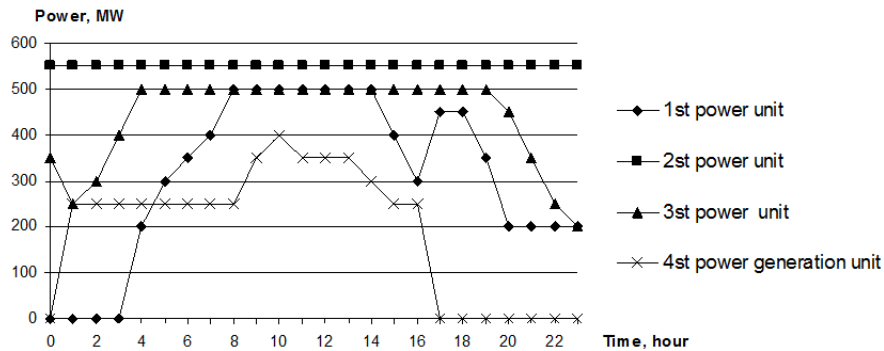


Рис. 5 – Графики нагрузки энергоблоков согласно новому решению.  
Суммарная стоимость: 17 766 000 грн.

Изменения состояний 1-го энергоблока в соответствии с решением задачи по второму варианту, показанные на рис. 6, в точности совпадают с изменени-

ями состояний 4-го энергоблока по первому варианту решения, показанному на рис. 4. Отличия заключаются в объемах генерации энергоблоков (см. рис. 5).

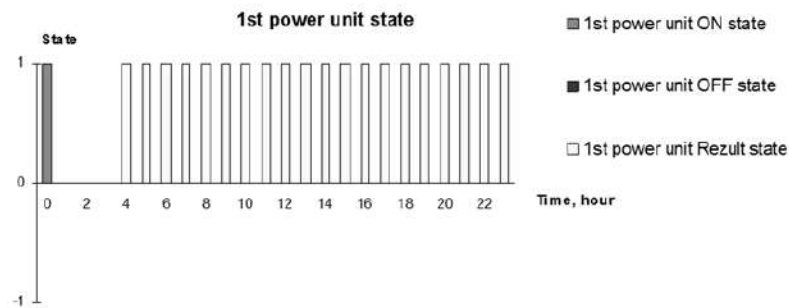


Рис. 6 –График изменения состояния 1-го энергоблока по новому решению.

На рис. 7 приведены изменения состояний 4-го блока по новому решению. При этом, хотя состояние блока изменяется после его включения и выключения, но блок продолжает работать до завершения соответствующих процессов в соответствии с заданными параметрами.

Изменения состояний 4-го энергоблока, согласно решения задачи по второму варианту, после его включения отражают минимальное время перехода блока в рабочее состояние, равное 1-му часу, а также – сохранение рабочего состояния блока в течение 4 часов после выключения.

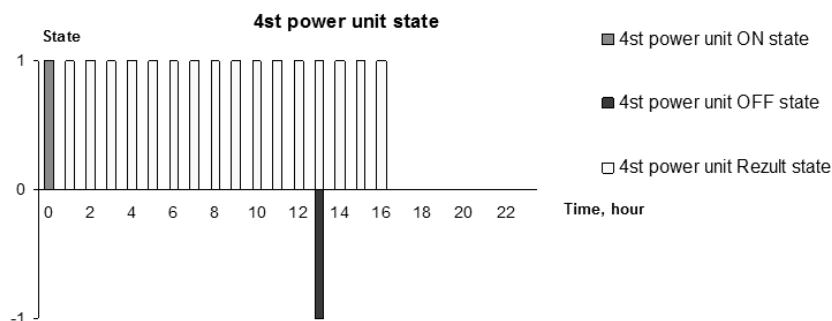


Рис. 7 – График изменения состояния 4-го энергоблока по новому решению.

Почасовые объемы генерации соответствуют значениям, определенным в соответствии с новым решением задачи, и приведены на графике нагрузки 4-го энергоблока, рис. 5. Следует отметить существование зависимости удельной стоимости производства электроэнергии от ее объемов производства. Наличие указанной зависимости приводит к необходимости выполнять серии расчетов, в которых текущие оценки удельной стоимости производства электроэнергии заменяются фактическими значениями, полученными путем сопоставления всех затрат на производство электроэнергии с его объемами. Так как объемы генерации являются непрерывными величинами, то процесс сходится за конечное число итераций.

Другой аспект влияния на процессы производства электроэнергии – это результаты решения задач управления более высокого уровня. Такие решения непосредственно определяют состав задач, структуру ограничений, значения параметров и ограничений задач управления на нижележащих уровнях.

В целом, приведенные результаты расчетов и их формы представления свидетельствуют о возможности использования разработанных программных решений и их практического применения в процессах текущего планирования производственной мощности энергосистемы с формированием планов-графиков нагрузки энергоблоков и с возможностью проведения исследований вариантов решений.

Помимо этого, совместно с представленной задачей может быть рассмотрена задача минимизации потерь при транспортировке электроэнергии от поставщиков и производителей к потребителям на уровне распределительных сетей.

**Выводы.** Современное состояние производства, распределения, поставок и потребления электроэнергии требует формирования новых механизмов балансирования платежеспособного спроса, учета непредвиденных нагрузок и предложений производства и поставок с позиций обеспечения их эффективности. Результаты решения формализованного представления этих задач могут быть использованы для формирования графика нагрузки энергоблоков генерирующих компаний с учетом их состояний, объемов, динамики поставок и потребления электроэнергии при

составлении долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных контрактов, а также – для создания современных SMART-сетей в электроэнергетике.

**Список литературы:** 1. Бурков В. Н., Губко М. В., Новиков Д. А. Организационные механизмы управления в электроэнергетике // Управление развитием крупномасштабных систем. – М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2012. – С. 261–278. 2. Антоненко А. В., Угольницкий Г. А. Модели мотивационного управления в электроэнергетике и проблемы их идентификации / Управление большими системами. Выпуск 47. М. : ИПУ РАН, 2014. – С. 92–124. 3. Hasani M., Hosseini S. H. Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms // Energy. – 2011. – № 36. – P. 277–293. 4. Вороний Н. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3. – С. 11–15. 5. Шевченко С. В. Распределение объемов производства и поставок электроэнергии с учетом состояния субъектов энергосистемы // Открытое образование. – 2011. – № 2 (86). Ч. 2. – С. 234–238. 6. Шевченко С. В., Пивненко А. М. Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 67. – С. 196–202. 7. Smart Grids European Technology Platform. Режим доступа: <http://www.smartgrids.eu>. Дата обращения: 28 декабря 2015. 8. Костров Д. Умные сети электроснабжения [smart grid] и проблемы с кибербезопасностью // Информационная безопасность. – 2014. – № 3. – С. 45–47.

**Bibliography (transliterated):** 1. Burkov, V. N., M. V. Gubko and D. A. Novikov. "Organizacionnye mehanizmy upravlenija v jelektrojenergetike." *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem*. Moscow: Fizmatlit, 2012. 261–278. Print. 2. Antonenko, A. V., and G. A. Ugolnizkiy. "Modeli motivacionnogo upravlenija v jelektrojenergetike i problemy ih identifikacii." *Upravlenie bol'shimi sistemami*. No. 47. Moscow: IPURAN, 2014. 92–124. Print. 3. Hasani M., and S. H. Hosseini. "Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms." *Energy* 36 (2011): 277–293. Print. 4. Voropay, N. I. "Intel'lectual'nye jelektrojenergeticheskie sistemy: koncepcija, sostojanie, perspektivy." *Avtomatizacija i IT v jenergetike* 3 (2011): 11–15. Print. 5. Shevchenko, S. V. "Raspredelenie ob'emov proizvodstva i postavok jelektrojenergii s uchetom sostojanija sub#ektov jenergosistemy." *Otkrytoe obrazovanie* 2(86).2 (2011): 234–238. Print. 6. Shevchenko, S. V., and A. M. Pivnenko. "Formirovanie planov proizvodstva jelektrojenergii s uchetom dinamiki izmenenija sostojanija jenergosistemy." *Visnyk NTU «HPI»*. No. 67. 2010. 196–202. Print. 7. Smart Grids European Technology Platform, 2015. Web. 12 December 2015 <<http://www.smartgrids.eu>>. 8. Kostrov, D. "Umnye seti jelektrosnabzhenija [smart grid] i problemy s kiberbezopasnost'ju." *Informacionnaja bezopasnost'* 3 (2014): 45–47. Print.

Поступила (received) 05.12.2015

**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-shevchenko@ukr.net.

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

**Егоянец Арсений Артемович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (057) 707-64-74; e-mail: artemegoyanc@mail.ru.

**Egoyanc Arseniy Artemovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (057) 707-64-74; e-mail: artemegoyanc@mail.ru.



**В. В. КАРПЕНКО, Р. Х. АХМАДОВ**

## ТРАНСПОРТНАЯ ЗАДАЧА ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С НЕЧЕТКИМ СПРОСОМ

Рассмотрена модель транспортной задачи линейного программирования, в которой спрос на транспортируемый продукт в пунктах его реализации задан нечетко. Предложен метод решения этой задачи, учитывающий потери, связанные с неопределённостью спроса, а также транспортные расходы. Метод реализует итерационную процедуру последовательного улучшения плана.

**Ключевые слова:** транспортная задача, линейное программирование, нечеткий спрос.

**Введение.** Каноническая транспортная задача линейного программирования формулируется следующим образом [1].

Пусть имеется  $m$  пунктов производства некоторого продукта и  $n$  пунктов его потребления. Производство и потребление сбалансированы, т.е. общие объемы производства и потребления равны между собой. Задача заключается в отыскании рационального плана перевозок из пунктов производства к пунктам потребления, при котором транспортные расходы минимальны. Полученный в результате решения план перевозок должен удовлетворять следующим требованиям: 1) спрос каждого из пунктов потребления должен полностью удовлетворяться; 2) весь произведенный в каждом пункте производства продукт должен полностью использоваться.

Формализуем поставленную задачу. Введем следующие обозначения:

$x_{ij}$  – количество единиц продукта, перевозимого из  $i$ -го пункта производства в  $j$ -й пункт потребления;

$c_{ij}$  – стоимость перевозки единицы продукта из  $i$ -го пункта в  $j$ -й;

$a_i$  – количество единиц продукта, производимое в  $i$ -м пункте;

$b_j$  – количество единиц продукта, потребляемое в  $j$ -м пункте.

В принятых обозначениях сформулированная задача сводится к отысканию набора переменных  $\{x_{ij}\}$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , минимизирующего целевую функцию

$$L(\{x_{ij}\}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

и удовлетворяющего ограничениям

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

В системе сделанных здесь допущений наиболее

жестким и практически всегда нарушаемым является предположение о том, что величина спроса в каждом из пунктов потребления точно известна. В связи с этим гораздо более естественно считать, что в отношении значений  $b_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , имеется неопределенность. Характер этой неопределенности может быть различным. Если для каждого пункта потребления получена предварительная выборка значений спроса, то её стандартная статистическая обработка в рамках теоретико-вероятностного подхода позволяет получить плотность распределения наблюдаемой величины спроса и её моменты. На практике дело обстоит не так: имеющихся данных оказывается достаточно только для получения удовлетворительных по качеству оценок диапазона возможных значений спроса в каждом пункте и его математического ожидания. Это обстоятельство приводит к целесообразности использования для описания системы транспортировок аппарата нечеткой математики [2–5]. Сформулируем постановку транспортной задачи в условиях, когда спрос в пунктах потребления задан нечетко.

**Постановка задачи.** С учетом сказанного введем описание возможных значений спроса в пунктах потребления  $b_j$  функциями принадлежности  $\varphi_j(b_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Появляющаяся при этом некоторая свобода выбора значений заказываемого объема продукта  $z_j$  обладает важным достоинством, так как позволяет учесть различия в величине потерь при неудачном выборе величины заказа. Введем

$R_1(z_j)$  – величина потерь, появляющихся в случаях, когда заказ  $z_j$  превышает спрос и возникает необходимость хранения нереализованного продукта,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

$R_2(z_j)$  – величина потерь, появляющихся, если спрос  $b_j$  в конкретном  $j$ -м пункте реализации продукта превышает заказ  $z_j$  и в результате этого, помимо ущерба, связанного с потерей имиджа, возникают потери дефицита (недополучение возможной прибыли).

Понятно, что в этой ситуации набор значений  $z_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , необходимо каким-то разумным способом выбирать. В связи с этим формальная постановка задачи преобразуется к следующей: найти

наборы  $Z = (z_j)$  и  $X(Z) = \{x_{ij}(z_j)\}$ , минимизирующие

$$L(x_{ij}(z_j)) = \sum_{j=1}^n R_1(z_j) + \sum_{j=1}^n R_2(z_j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}(z_j) \quad (4)$$

и удовлетворяющие ограничениям

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}(z_j) = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij}(z_j) = z_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n z_j = \sum_{i=1}^m a_i, \quad (7)$$

$$x_{ij}(z_j) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

**Основной материал.** Получим аналитическое описание функций  $R_1(z_j)$  и  $R_2(z_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Так как  $z_j$  – нечеткие числа, то и любая их функция – тоже нечетное число. Используя функции принадлежности  $\varphi_j(b_j)$ , введем функции

$$\tilde{\varphi}_j(b_j) = \frac{\varphi_j(b_j)}{\int_{G_j} \varphi(b_j) db_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где  $G_j$  – диапазон возможных значений  $b_j$ .

Полученные функции  $\tilde{\varphi}_j(b_j)$  обладают всеми свойствами плотностей распределения случайных величин: они неотрицательны и удовлетворяют условию нормировки, то есть

$$\int_{G_j} \tilde{\varphi}(b_j) db_j = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Функция  $\varphi_j(b_j)$  может быть использована для расчета ожидаемого значения нечеткого числа  $z_j$

$$m_j = \int_{G_j} b_j \tilde{\varphi}(b_j) db_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

являющегося естественным аналогом определяемого в теории вероятностей значения математического ожидания случайной величины с использованием плотности её распределения.

При этом ожидаемое значение затрат на хранение нереализованной части продукта будет равно

$$R_1(z_j) = \alpha_j \int_0^{z_j} (z_j - b_j) \tilde{\varphi}(b_j) db_j, \quad (12)$$

где  $\alpha_j$  – средние затраты на хранение единицы продукта в  $j$ -м пункте реализации,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Аналогично этому определим потери от дефицита

$$R_2(z_j) = \beta_j \int_{z_j}^{\infty} (b_j - z_j) \tilde{\varphi}(b_j) db_j, \quad (13)$$

где  $\beta_j$  – средняя прибыль, получаемая от реализации продукта в  $j$ -м пункте реализации,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Полученные соотношения (12) и (13) можно использовать для независимого расчета рациональных значений  $z_j$  для каждого из пунктов реализации, минимизирующих суммарные затраты на хранение не проданной части продукта и потери от дефицита.

С этой целью для  $j$ -го пункта реализации введем

$$\begin{aligned} R_j(z_j) &= R_1(z_j) + R_2(z_j) = \alpha_j \int_0^{z_j} (z_j - b_j) \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + \\ &+ \beta_j \int_{z_j}^{\infty} (b_j - z_j) \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = \alpha_j z_j \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j - \\ &- \alpha_j \int_0^{z_j} b_j \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + \beta_j \int_{z_j}^{\infty} b_j \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j - \\ &- \beta_j z_j \int_{z_j}^{\infty} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Теперь рациональное значение  $z_j$  найдем путем дифференцирования  $R_j(z_j)$  по  $z_j$ , приравнявая его результат к нулю и решая получаемое уравнение.

Так как

$$\frac{d}{dz_j} \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = \tilde{\varphi}_j(z_j), \quad \frac{d}{dz_j} \int_{z_j}^{\infty} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = -\tilde{\varphi}_j(z_j),$$

$$\frac{d}{dz_j} \int_0^{z_j} b_j \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = z_j \tilde{\varphi}_j(z_j),$$

$$\frac{d}{dz_j} \int_{z_j}^{\infty} b_j \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = -z_j \tilde{\varphi}_j(z_j),$$

то

$$\frac{dR_j(z_j)}{dz_j} = \alpha_j \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + \alpha_j z_j \tilde{\varphi}_j(z_j) -$$

$$- \alpha_j z_j \tilde{\varphi}_j(z_j) - \beta_j z_j \tilde{\varphi}_j(z_j) -$$

$$- \beta_j \int_{z_j}^{\infty} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + b_j z_j \tilde{\varphi}_j(z_j) = \alpha_j \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j -$$

$$-\beta_j \left(1 - \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j\right) = (\alpha_j + \beta_j) \int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j - \beta_j = 0.$$

Отсюда

$$\int_0^{z_j} \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j = \frac{\beta_j}{\alpha_j + \beta_j}.$$

Полученное уравнение относительно  $z_j$  решается численно, а если функция  $\tilde{\varphi}_j(b_j)$  интегрируема, то и аналитически. Пусть, например плотность распределения  $\tilde{\varphi}_j(b_j)$  соответствует закону Рэлея, то есть

$$\tilde{\varphi}_j(b_j) = \frac{b_j}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{b_j^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{z_j} \frac{b_j}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{b_j^2}{2\sigma^2}\right\} db_j &= -\int_0^{z_j} \frac{d}{db_j} \left( \exp\left\{-\frac{b_j^2}{2\sigma^2}\right\} \right) = \\ &= -\exp\left\{-\frac{b_j^2}{2\sigma^2}\right\} \Big|_0^{z_j} = 1 - \exp\left\{-\frac{z_j^2}{2\sigma^2}\right\}. \end{aligned}$$

При этом уравнение относительно  $z_j$  имеет вид

$$1 - \exp\left\{-\frac{z_j^2}{2\sigma^2}\right\} = \frac{\beta_j}{\alpha_j + \beta_j},$$

откуда

$$\begin{aligned} \exp\left\{-\frac{z_j^2}{2\sigma^2}\right\} &= 1 - \frac{\beta_j}{\alpha_j + \beta_j} = \frac{\alpha_j}{\alpha_j + \beta_j}, \\ -\frac{z_j^2}{2\sigma^2} &= \ln \frac{\alpha_j}{\alpha_j + \beta_j}, \quad z_j = \pm \sigma \sqrt{2 \ln \frac{\alpha_j + \beta_j}{\alpha_j}}. \end{aligned}$$

Выбирая положительный корень, имеем

$$z_j^{(0)} = \sigma \sqrt{2 \ln \frac{\alpha_j + \beta_j}{\alpha_j}}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Получаемый при этом набор  $\{z_1^{(0)}, z_2^{(0)}, \dots, z_n^{(0)}\}$  не обязательно удовлетворяет условиям баланса, то есть

$$\sum_{j=1}^n z_j^{(0)} \neq \sum_{i=1}^m a_i = a.$$

Найдем значения  $z_j$ , минимально удаленные от  $z_j^{(0)}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , и удовлетворяющие условию баланса. Используем метод неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа имеет вид

$$\Phi(z_1, z_2, \dots, z_n) = \sum_{j=1}^n (z_j - z_j^{(0)}) + \lambda \left( \sum_{j=1}^n z_j - a \right).$$

Отсюда

$$z_j = z_j^{(0)} - \frac{\lambda}{2}, \quad \sum_{j=1}^n z_j = \sum_{j=1}^n z_j^{(0)} - \frac{n\lambda}{2} = a,$$

$$-\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{n} \left( a - \sum_{j=1}^n z_j^{(0)} \right).$$

Тогда искомый набор  $z_j$  определяется соотношением

$$z_j = z_j^{(0)} + \frac{1}{n} \left( a - \sum_{j=1}^n z_j^{(0)} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Полученный набор  $z_j$  удовлетворяет условию баланса и может быть использован при решении задачи (1)–(3). Вместе с тем, этот набор не учитывает условий транспортирования и поэтому не минимизирует расходы транспортировки. В связи с этим естественно поставить задачу отыскания компромиссного набора  $z_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , и соответствующего плана транспортировки  $X(Z)$ , которые доставляли бы минимум комплексному критерию, учитывающему затраты на хранение нереализованного продукта, потери от дефицита и транспортные расходы. Соответствующая функция приобретает вид:

$$\begin{aligned} L(x_{ij}(z_j)) &= \sum_{j=1}^n \alpha_j \int_0^{z_j} (z_j - b_j) \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + \\ &+ \sum_{j=1}^n \beta_j \int_{z_j}^{\infty} (b_j - z_j) \tilde{\varphi}_j(b_j) db_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}(z_j). \end{aligned} \quad (14)$$

Полученная задача отыскания наборов  $Z$  и  $X(Z)$ , минимизирующих (14) и удовлетворяющих (5)–(8), уже не является задачей линейного программирования. Вместе с тем, она может быть решена с использованием методов нулевого порядка, например, методом Нелдера – Мида [6]. В соответствии с этим методом введем совокупность наборов

$$Z_1 = \begin{pmatrix} z_{11} \\ z_{12} \\ \dots \\ z_{1n} \end{pmatrix}, Z_2 = \begin{pmatrix} z_{21} \\ z_{22} \\ \dots \\ z_{2n} \end{pmatrix}, \dots, Z_{n+1} = \begin{pmatrix} z_{n+1,1} \\ z_{n+1,2} \\ \dots \\ z_{n+1,n} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

компоненты которых определены по формулам

$$z_{kj} = \begin{cases} \frac{c_0}{n} \left( 1 + \frac{s(n-1)}{n} \right), & k = j, \\ \frac{c_0}{n} \left( 1 - \frac{s}{n} \right), & k \neq j, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$c_0 = \sum_{i=1}^m a_i, \quad s \in [0;1].$$

Легко видеть, что для любого  $k = 1, 2, \dots, n+1$  имеет место

$$\sum_{j=1}^n z_{kj} = \frac{c_0}{n} \left( 1 + \frac{s(n-1)}{n} \right) + \frac{(n-1)c_0}{n} \left( 1 - \frac{s}{n} \right) = \frac{c_0}{n} \left[ 1 + \frac{s(n-1)}{n} + (n-1) - \frac{(n-1)s}{n} \right] = c_0 = \sum_{i=1}^m a_i. \quad (17)$$

Выполнение равенства (17) вместе с очевидной неотрицательностью любого  $z_{kj}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n+1$ ,

$j = 1, 2, \dots, n$ , означает, что каждый из наборов  $z_1, z_2, \dots, z_{n+1}$  может быть использован в качестве допустимого плана заказов, удовлетворяющего условию баланса (7). Далее с использованием всех этих наборов решаются  $(n+1)$  транспортных задач (1), (5)–(8) в результате чего получим наборы  $X_1(z_1), X_2(z_2), \dots, X_{n+1}(z_{n+1})$ . Теперь эти наборы вместе с совокупностью наборов (15) используются для вычисления значений целевой функции (4). Получаемые при этом значения  $L(z_1, X(z_1)), L(z_2, X(z_2)), \dots, L(z_{n+1}, X(z_{n+1}))$  далее участвуют в стандартной процедуре улучшения плана, реализуемой методом Нелдера – Мида (см. рис. 1).

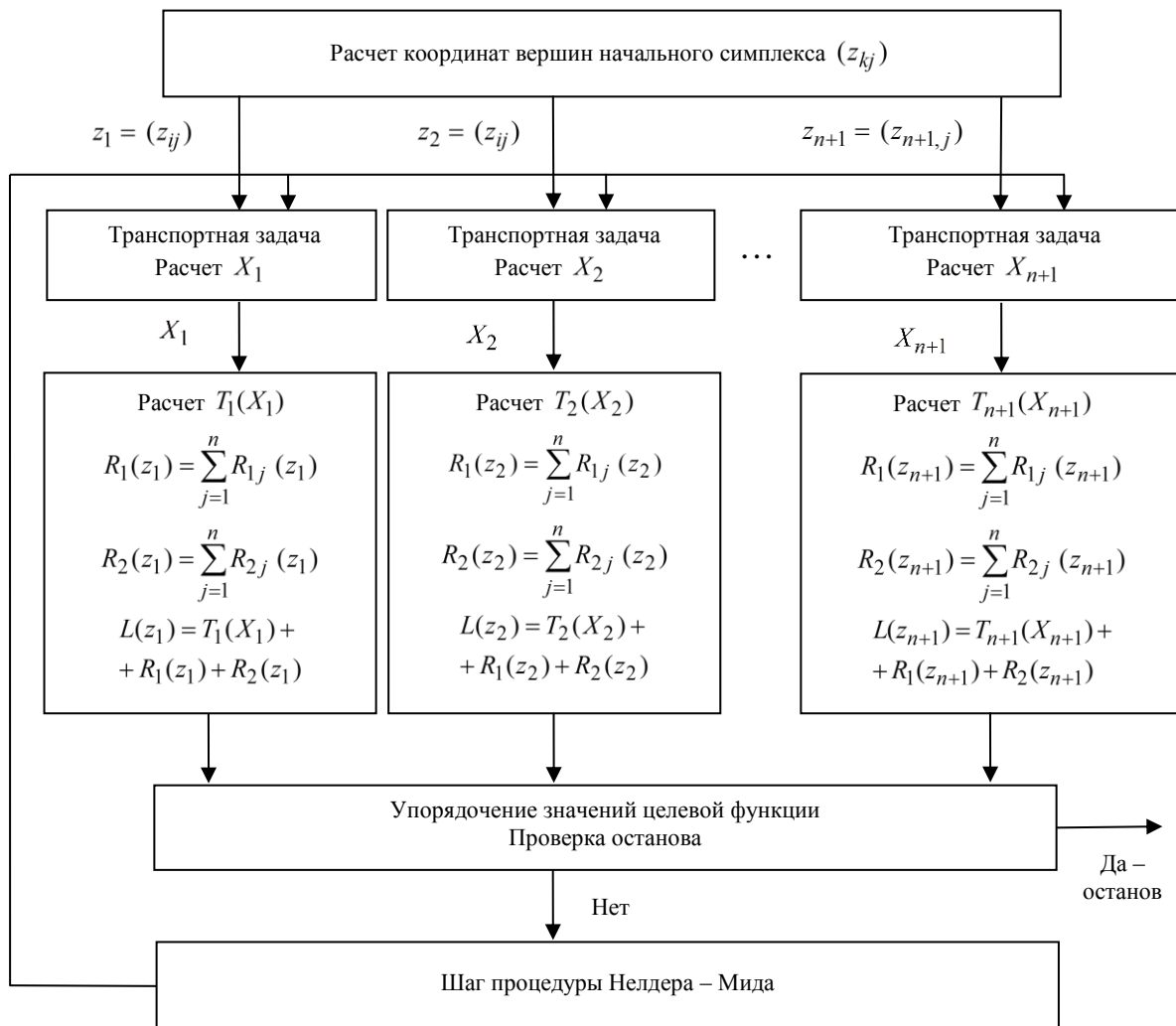


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма решения задачи

Другой, приближенный вариант решения задачи может быть получен с использованием следующей двухэтапной процедуры. На первом этапе с использованием рассчитанных по формуле (11) ожидаемых значений спроса в каждом из пунктов потребления

решается задача отыскания набора  $X = (x_{ij})$ , минимизирующего (1) и удовлетворяющего (2)–(3), а также ограничению

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = m_j, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Пусть  $X^{(0)} = (x_j^{(0)})$  – получаемое при этом решение транспортной задачи, которое будем называть модальным. Выделим теперь ненулевые компоненты плана  $X^{(0)}$ . Число этих компонентов равно  $m+n-1$ , а их номера образуют множество  $N = \{1, 2, \dots, m+n-1\}$ . Используя эту нумерацию преобразуем двухиндексную систему уравнений (2)–(3) в одноиндексную, задав вектор правых частей этих уравнений следующим образом  $D = (a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, b_1, b_2, \dots, b_n)$ .

Решение этой системы уравнений даст вектор  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{m+n-1})$ , компоненты которого будут линейно зависеть от нечетких значений  $b_1, b_2, \dots, b_n$  и, следовательно, будут нечеткими. Используя функции принадлежности нечетких чисел  $b_1, b_2, \dots, b_n$  в соответствии с правилами нечеткой математики [2] получим функции принадлежности нечетких чисел  $X_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, m+n-1$ . Далее по этим же правилам определим функцию принадлежности  $F(X)$  нечеткого значения линейной формы  $L(x) = \sum_{k \in N} c_k x_k$ .

Теперь в качестве четкого решения исходной задачи примем набор  $X$ , минимизирующий составной критерий

$$J(x) = \int_{\Omega} F(X) dx + (X - X^{(0)})T(X - X^{(0)}). \quad (18)$$

Этот критерий имеет понятный смысл: первое его слагаемое определяет компактность функции при-

надлежности нечеткого значения  $L(x)$ , а второе равно сумме квадратов отклонений искомого решения от модального.

**Выводы.** Таким образом, в работе предложен метод решения транспортной задачи линейного программирования для случая, когда неопределенность спроса на реализуемый продукт определена в терминах нечеткой математики. Для решения задачи введен комплексный критерий, учитывающий затраты на хранение непроданной части продукта, потери от дефицита, а также транспортные расходы. Получение оптимального плана обеспечивается итерационной процедурой Нелдера – Мида. Рассмотрен альтернативный метод решения задачи, обеспечивающий двухшаговый вариант получения решения.

**Список литературы:** 1. Раскин Л. Г. Анализ сложных систем / Л. Г. Раскин – М.: Сов. Радио, – 1976. – 344 с. 2. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский – М.: Наука, – 1981. – 206 с. 3. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад – М.: Радио и связь, – 1990. – 286 с. 4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман – М.: Радио и связь, – 1982. – 432 с. 5. Раскин Л. Г., Серая О. В. Нечеткая математика / Л. Г. Раскин, О. В. Серая – Х.: Парус, – 2008. – 352 с. 6. Раскин Л. Г. Математическое программирование / Л. Г. Раскин – Х.: НТУ «ХПИ», – 2002. – 124 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Raskin L. G. *Analiz slozhnyh system*. Moscow: Sov. Radio, 1976. Print. 2. Orlovskij S. A. *Problemy prinjatij reshenij pri nechetkoj ishodnoj informacii*. Moscow: Nauka, 1981. Print. 3. Djubua D., Prad A. *Teoriya vozmozhnostej. Prilozhenie k predstavleniju znaniy v informatike*. Moscow: Radio i svjaz, 1990. Print. 4. Kofman A. *Vvedenie v teoriju nechetkih mnozhestv*. Moscow: Radio i svjaz, 1982. Print. 5. Raskin L. G., Seraja O. V. *Nechetkaja matematika*. Kharkiv: Parus, 2008. Print. 6. Raskin L. G. *Matematicheskoe programmirovanie*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2002. Print.

Поступила (received) 07.12.2015

**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.

**Карпенко 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.

**Ахмадов Рустам Хусейнович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры Компьютерного мониторинга и логистики; тел.: (057) 707-66-28; e-mail: kml\_kml@bk.ru.

**Akhmadov Rustam Huseynovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student Department of Computer Monitoring and logistics; tel.: (057) 707-66-28; e-mail: kml\_kml@bk.ru.

*А. М. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСКИЙ*

## **ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ**

В статье рассматривается задача поддержки процесса исследования и анализа бизнес-структуры предприятия, рассматриваются задачи моделирования, анализа и оптимизации бизнес-процессов, их место и роль в управлении предприятием. Также были рассмотрены проблемы моделирования бизнес-процессов, место и роль моделирования бизнес-процессов в задачи анализа деятельности предприятия, вопросы, связанные с оптимизацией бизнес-процессов и основные подходы к ее проведению. Для решения поставленной задачи предлагается использовать средства имитационного моделирования, различные математические модели и методы. Для информационной поддержки решения поставленной задачи разработана база данных и приложение, реализующее соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение решения поставленной задачи.

**Ключевые слова:** предприятие, бизнес-структура, бизнес-процессы, моделирование бизнес-процессов, анализ бизнес-процессов, оптимизация бизнес-процессов.

**Введение.** Современные технологии бизнеса характеризуются высокой динамичностью, связанной с постоянно изменяющимися потребностями рынка, ориентацией производства товаров и услуг на индивидуальные потребности заказчиков и клиентов, непрерывным совершенствованием технических возможностей и сильной конкуренции.

На сегодняшний день все больше предприятий и организаций сталкиваются с необходимостью выбирать для себя лучшие варианты реализации своих бизнес-процессов для обеспечения своей конкурентоспособности.

Очевидно, что такая перестройка в условиях большого или среднего предприятия требует тщательно разработанной методологической основы и применение формальных методов для реализации этой перестройки с целью уменьшения негативных последствий неверных управленческих решений.

Построить эффективную систему управления организации, не экспериментируя над предприятием и сотрудниками, возможно посредством использования методики моделирования бизнес-процессов.

Современные подходы к моделированию, анализу и оптимизации бизнес-процессов опираются на применение информационных технологий, что значительно ускоряет осуществление этих мероприятий, повышает оперативность деятельности персонала, ускоряет передачу информации на всех уровнях управления, благодаря чему повышаются конкурентные позиции предприятий.

**Задачи моделирования, анализа и оптимизации бизнес-процессов, их место и роль в управлении предприятием.** Бизнес-процесс – это логический, последовательный, взаимосвязанный набор мероприятий, который потребляет ресурсы, создает ценность и выдает результат [1].

Моделирование бизнес-процессов или бизнес-моделирование – это деятельность по выявлению и описанию существующих бизнес-процессов, проведению анализа процессов, а также проектированию новых бизнес-процессов.

Средства бизнес-моделирования способствуют эффективному взаимодействию различных подразделений организации и обеспечивают взаимопонимание

управленцев и исполнителей.

Результатом бизнес-моделирования является единая информационная система управления всем предприятием. Кроме того, бизнес-моделирование призвано обеспечить сокращение затрат на производство, повышение качества продукции и уровня сервиса.

Разработка бизнес-модели предприятия позволяет существенно ускорить процедуру внедрения и сертификации системы менеджмента качества, а впоследствии снизить затраты на ее поддержание на должном уровне.

Результаты бизнес-моделирования могут применяться как для целей управленческого реинжиниринга бизнес-процессов, так и для автоматизации процессов в информационной системе. Обычно бизнес-моделирование осуществляется с помощью нотаций бизнес-процессов, то есть способов их визуального отображения.

Одним из методов анализа текущей деятельности предприятия является составление модели бизнес-процессов AS IS (как есть). После этого модель бизнес-процессов подвергается критическому анализу или обрабатывается специальным программным обеспечением. По результатам анализа формируется модель бизнес-процессов TO BE (как должно быть) и план мероприятий по внедрению необходимых изменений.

**Оптимизация бизнес-процессов и основные подходы к ее проведению.** Постоянно осуществляя мониторинг и проводя анализ бизнес-процессов, предприятие находит резервы повышения эффективности своей деятельности путем оптимизации бизнес-процессов, которая представляет собой метод совершенствования бизнес-процессов путем выбора оптимального варианта их исполнения.

В процессе оптимизации бизнес-процессов могут быть выявлены и устранены следующие недостатки:

- дублирование функций;
- «узкие места»;
- чрезмерная стоимость любых операций;
- низкое качество выполнения операций;
- наличие лишних операций;
- несогласованность действий участников и т.п.

Оптимизация может быть двух типов:

- постоянное совершенствование процессов;
- периодические радикальные изменения.

Первый тип используется в рамках текущей деятельности, когда предприятию не нужны резкие изменения.

Второй тип используется, когда необходимы преобразования в связи с существенно измененным порядком деятельности, например, с проведением комплексной автоматизации. Техника революционной оптимизации бизнес-процессов называется реинжинирингом [1].

Оптимизация бизнес-процессов [2] должна проводиться, в первую очередь, на основных этапах жизненного цикла продукции: этапе планирования, выполнения проектных работ, изготовления продукции, сервисного обслуживания и ресурсного обеспечения производственного процесса.

Прежде чем приступить к оптимизации, необходимо убедиться, что правильно выбран процесс или группа процессов для улучшения.

Приведем перечень наиболее распространенных методов анализа и оптимизации бизнес-процессов:

- SWOT-анализ (анализ сильных и слабых сторон бизнес-процесса);
- метод причин-следствий (диаграмма Исикавы);
- бенчмаркинг;
- анализ и оптимизация бизнес-процессов на основе показателей KPI;
- методика Lean;
- методика «б сигма»;
- расчет и изменение фрагментарности процесса;
- анализ бизнес-логики процесса;
- метод функционально-стоимостного анализа;
- метод имитационного (динамического) моделирования бизнес-процесса;
- расчет и анализ трудоемкости и длительности бизнес-процесса;
- анализ матрицы распределения ответственности;
- анализ автоматизированности процесса.

В проекте по анализу и оптимизации бизнес-процессов можно выделить следующие этапы:

- ранжирование бизнес-процессов и выбор приоритетных для анализа и оптимизации – как известно, далеко не во всех бизнес-процессах возможно и целесообразно проводить изменения, поэтому в первую очередь рекомендуется выбрать наиболее важные и проблемные бизнес-процессы, у которых высока готовность к проведению изменений;
- анализ бизнес-процессов с помощью выбранных методов – необходимо выбрать наиболее актуальные методы анализа для конкретных бизнес-процессов с учетом их специфики и проблемности, подготовить технологии, программные продукты и

исходные данные для реализации методов, реализовать методы, сформировать отчет по анализу и рекомендации по оптимизации бизнес-процессов;

- оптимизация бизнес-процессов – реализация рекомендаций по оптимизации;
- регламентация и внедрение оптимизированных бизнес-процессов.

**Постановка задачи.** В современных условиях каждое предприятие должно постоянно проводить мониторинг и осуществлять анализ своих бизнес-процессов.

Благодаря этим мерам предприятие находит резервы повышения эффективности своей деятельности путем оптимизации бизнес-процессов. Непрерывный анализ и оптимизация бизнес-процессов предприятия является залогом обеспечения его конкурентоспособности. Это определяет актуальность задачи поддержки процесса исследования и анализа бизнес-структуры предприятия.

Бизнес-структура является связанным множеством бизнес-процессов, конечной целью которого является выпуск продукции в виде товаров, услуг, документов и т.п. Для решения поставленной задачи и, в частности, ее составляющих необходимо использовать соответствующие средства имитационного моделирования и математические методы.

Имитационное моделирование бизнес-процессов будем осуществлять с помощью математического аппарата сетей Петри, функционально-стоимостной анализ бизнес-процессов будем осуществлять с помощью соответствующего алгоритма метода функционально-стоимостного анализа, оптимизацию бизнес-процессов на основе показателей будем осуществлять с помощью метода сетевого планирования и отбора, путем кластеризации моделей бизнес-процессов, наиболее удачных аналогов построения бизнес-процессов.

Решение поставленной задачи представляет собой трудоемкий с точки зрения вычислений процесс и предусматривает хранение и обработку больших объемов данных. Следовательно, такая задача не может быть решена без использования современных информационных технологий.

**Математическое и алгоритмическое обеспечение решения поставленной задачи.** В современной практике организационного управления широкое распространение получили графические модели бизнес-процессов.

Вместе с тем, существует давно известный и обладающий мощными аналитическими возможностями при исследовании дискретных систем аппарат сетей Петри.

Поскольку организационные системы, описанные с помощью моделей типа IDEF0 (или IDEF3 и ARIS ePC) относятся именно к этому классу, представляется возможным их исследование с помощью сетей Петри. Для того чтобы применить моделирующие возможности сетей Петри для анализа событийных

моделей предварительно необходимо решить задачу преобразования графической модели в соответствующую ей сеть [3]. Диаграмма в нотации IDEF0 (или IDEF3 и ARIS eEPC) в упрощенном виде может быть описана графом:

$$D = (S_0, L_0),$$

где  $S_0 = \{s_1, \dots, s_q\}$  – множество символов модели бизнес-процесса (процессы, события, перекресток);

$q$  – количество символов;

$L_0 = \{l_1, \dots, l_r\}$  – множество связей модели бизнес-процесса;

$r$  – количество связей.

Сопоставим каждому символу  $s_i$  модели бизнес-процесса переход  $t_i$  сети Петри, а каждой связи  $l_j$  – позицию  $p_j$  сети Петри.

Для обеспечения моделирующих возможностей сети Петри необходимо ввести дополнительные позиции сети Петри, соответствующие началу и завершению цепочки процесса. Для этого добавляются дополнительные позиции для каждого перехода, который не имеет инцидентных позиций на входе или на выходе.

Наряду с моделированием с помощью сетей Петри, имеет место построение функционально-стоимостных моделей, которое осуществляется на основе применения методологической и технологической взаимосвязи между моделями IDEF0 и функционально-стоимостным анализом [4].

Оба метода рассматривают финансово-хозяйственную деятельность предприятия как множество последовательно выполняемых функций, а дуги входов, выходов, управления и механизмов работ  $c_j$  (функций) модели IDEF0 соответствуют стоимостным объектам и ресурсам модели функционально-стоимостного анализа:

$$c_j = \sum_{i=1}^k c_{ji}^C + \sum_{i=1}^l c_{ji}^M, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где  $n$  – количество однократных выполнений работы в процессе;

$k$  – количество управляющих воздействий;

$l$  – количество механизмов;

$c_{ij}^C$  – стоимость управляющего воздействия;

$c_{ij}^M$  – стоимость механизма.

В рамках метода функционально-стоимостного анализа, после определения затрат на выполнение функций переходят к построению функционально-стоимостной диаграммы. С помощью анализа этой диаграммы проверяется целесообразность высоких затрат на выполнение определенных функций. Для построения функционально-стоимостной диаграммы определим значимость выполняемых функций модели бизнес-процесса.

Степень значимости функций рассчитывается в баллах, для чего целесообразно использовать метод

расстановки приоритетов. При использовании этого метода группу из  $n$  функций расставляют в ряд  $x_1, x_2, \dots, x_n$  по возрастанию или убыванию степени проявления некоторого признака – значимости в нашем случае.

Далее формируется матрица  $A = (a_{ij})$ , которая заполняется по следующим правилам:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1,5; & x_i > x_j \\ 1,0; & x_i = x_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \\ 0,5; & x_i < x_j \end{cases}$$

где  $x_i > x_j$  – обозначает, что первый объект более предпочтителен по анализируемому признаку, чем второй;

$x_i = x_j$  – объекты равнозначны по анализируемому признаку;

$x_i < x_j$  – что первый объект менее предпочтителен по анализируемому признаку, чем второй.

Основное уравнение метода расстановки приоритетов в матричном виде будет выглядеть следующим образом:

$$P^H(k+1) = AP^H(k),$$

где  $P^H(k) = \{P_i^H(k)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – вектор-столбец нормированных интегрированных оценок значимости функций порядка  $k$ .

С использованием рассчитанных показателей значимости  $P^H(k)$  и относительных значений стоимостных показателей  $c^H$  работ (функций) бизнес-процесса, строится функционально-стоимостная диаграмма. На основе анализа построенной диаграммы определяются затраты, которые не сбалансированы со значимостью работ (функций) бизнес-процесса и принимается решение о необходимости оптимизации бизнес-процесса.

Для определения оптимальных показателей времени и стоимости выполнения бизнес-процессов будем использовать метод сетевого планирования, представляя модели бизнес-процессов в виде сетевых графиков.

Сопоставим каждой работе  $s_i$  модели бизнес-процесса работу сетевого графика, а каждой связи  $l_j$  между выходами и входами работ модели бизнес-процесса – зависимость между работами сетевого графика. Каждой работе сетевого графика, которая представляет собой работу бизнес-процесса, нужно поставить в соответствие продолжительность ее выполнения  $\tau_j$  и стоимость ее выполнения  $c_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Математическая постановка задачи определения изменения стоимости бизнес-процесса, в случае оптимизации сетевого графика по стоимости, будет выглядеть следующим образом:



$$\sum_{j=1}^n \Delta c_j = \sum_{j=1}^n (\tau_j^* - \tau_j) h_j \rightarrow \max,$$

$$\sum_{j=1}^n \tau_j^* \geq \sum_{j=1}^n a_j,$$

$$\sum_{j=1}^n \tau_j^* \leq \sum_{j=1}^n b_j,$$

$$a_j \leq \tau_j^* \leq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

где  $a_j$  – минимально возможная (экстренная) продолжительность работы;

$b_j$  – нормальная продолжительность выполнения работы;

$h_j$  – коэффициент расходов на ускорение работы;

$\Delta c_j$  – величина изменения стоимости выполнения работы  $c_j^* = c_j - \Delta c_j$ ;

$\tau_j^*$  – рассчитанное новое значение продолжительности выполнения работы.

Для задачи оптимизации сетевого графика по времени, целевая функция представленной выше задачи определения изменения стоимости бизнес-процесса будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n \Delta c_j = \sum_{j=1}^n (\tau_j^* - \tau_j) h_j \rightarrow \min.$$

Приведенные математические модели [5] являются задачами линейного программирования и могут быть решены с помощью соответствующих математических методов оптимизации.

Рассмотренный подход к оптимизации бизнес-процессов с помощью метода сетевого планирования предусматривает только оптимизацию показателей времени и стоимости бизнес-процессов, и не влияет на структуру процессов – работы, и связи между ними остаются неизменными.

В таком случае, предприятие должно заниматься структурной перестройкой своих бизнес-процессов, опираясь на недостаточно формализованные методы и, в значительной степени, на собственный опыт.

Однако, большинство предприятий на сегодняшний день совершенствуют свои бизнес-процессы, пользуясь лучшими практиками других организаций.

Предлагается проведение кластеризации [6] моделей бизнес-процессов для выбора наиболее удачных вариантов построения бизнес-процессов.

Сравнивать эталонные модели бизнес-процессов предлагается с заданной моделью  $x_0$  бизнес-процесса предприятия, который требует перестройки.

Выборку моделей бизнес-процессов  $X^n = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \subset X$  необходимо разбить на два кластера – кластер  $y_1$  похожих моделей на заданную модель  $x_0$ , и кластер  $y_2$  не похожих моделей на заданную модель  $x_0$ .

Основной интерес представляет собой множество символов модели бизнес-процесса  $S_0$ , поскольку именно символы (процессы, события, перекрестки) модели определяют содержание бизнес-процесса.

Таким образом, каждой модели бизнес-процесса  $x_0, x_1, \dots, x_n$  из выборки  $X^n$  будет соответствовать множество символов модели –  $x_i = \{s_1, \dots, s_q\} \in X^n$ .

Для того, чтобы определить расстояние между моделями бизнес-процессов будем использовать коэффициент Жаккара:

$$\rho_{i0}(x_i, x_0) = 1 - \frac{n(x_i \cap x_0)}{n(x_i \cup x_0)},$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Значение сходства между символами (строками) длиной  $n$  и  $m$  моделей бизнес-процессов определяется с помощью следующего выражения:

$$s(s_j, s_k) = 1 - \frac{d(s_j, s_k)}{\max\{n, m\}},$$

где  $d(s_j, s_k)$  – расстояние Левенштейна.

Выражение для определения количества общих символов для моделей бизнес-процессов будет следующим:

$$n(x_i \cap x_0) = \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{k=1}^{q_0} s(s_j, s_k),$$

где  $q_i$  – количество символов в модели бизнес-процесса  $x_i$ ;

$q_0$  – количество символов в модели бизнес-процесса  $x_0$ .

Результаты кластеризации  $y_1$  могут быть использованы в качестве рекомендаций к реорганизации моделей  $x_0$  бизнес-процессов предприятия, требующих совершенствования.

Рассмотрев необходимые математические модели и методы, определим последовательность действий при решении поставленной задачи:

- преобразование модели бизнес-процесса в сеть Петри;
- имитационное моделирование бизнес-процесса, расчет временных и стоимостных показателей бизнес-процесса;
- функционально-стоимостной анализ бизнес-процесса, принятие решения о необходимости оптимизации бизнес-процесса;
- оптимизация показателей бизнес-процесса с помощью метода сетевого планирования;
- кластеризация моделей бизнес-процессов, которые могут быть использованы в качестве рекомендаций к перестройке бизнес-процессов, требующих совершенствования.

**Разработка программного обеспечения для решения поставленной задачи.** В состав информационной технологии обработки данных должны входить следующие модули:

- модуль сбора данных;
- модуль хранения данных (для их хранения создаются базы данных);
- модуль обработки данных (вычисления, включающие арифметические и логические операции, выполняемые над данными, дающие возможность получать новые данные)
- модуль формирования отчетов.

Программное обеспечение (рис. 1), содержащее все приведенные выше модули и предназначенное для решения поставленной задачи, было разработано с использованием технологии Java EE (Enterprise Edition).

Выбор данной технологии обусловлен тем, что Java EE является свободно распространяемой промышленной технологией и используется в проектах, в которых необходима надежность, масштабируемость, гибкость.

Конфигурирование компонентов и управление жизненным циклом Java-объектов системы обеспечивает IoC-контейнер фреймворка Spring.

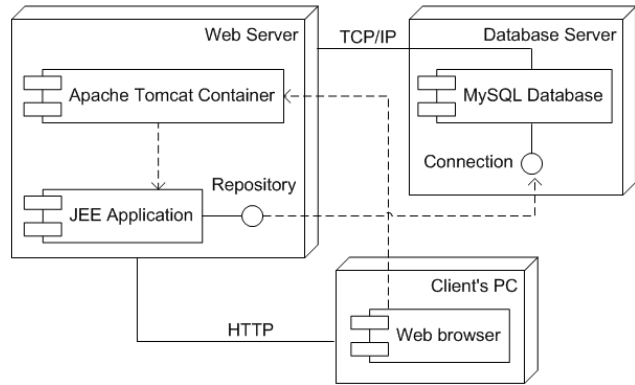


Рис. 1 – Диаграмма развертывания

Для хранения и управления данными выбрана свободно распространяемая система управления базами данных MySQL, с использованием которой была создана база данных разработанной системы (рис. 2).

Разработанное программное обеспечение имеет клиент-серверную архитектуру «тонкий клиент», при которой все задачи по обработке и хранению данных выполняет сервер, а web-клиент, которым может являться любой современный браузер, выполняет задачу отправки запросов и отображения ответов сервера.

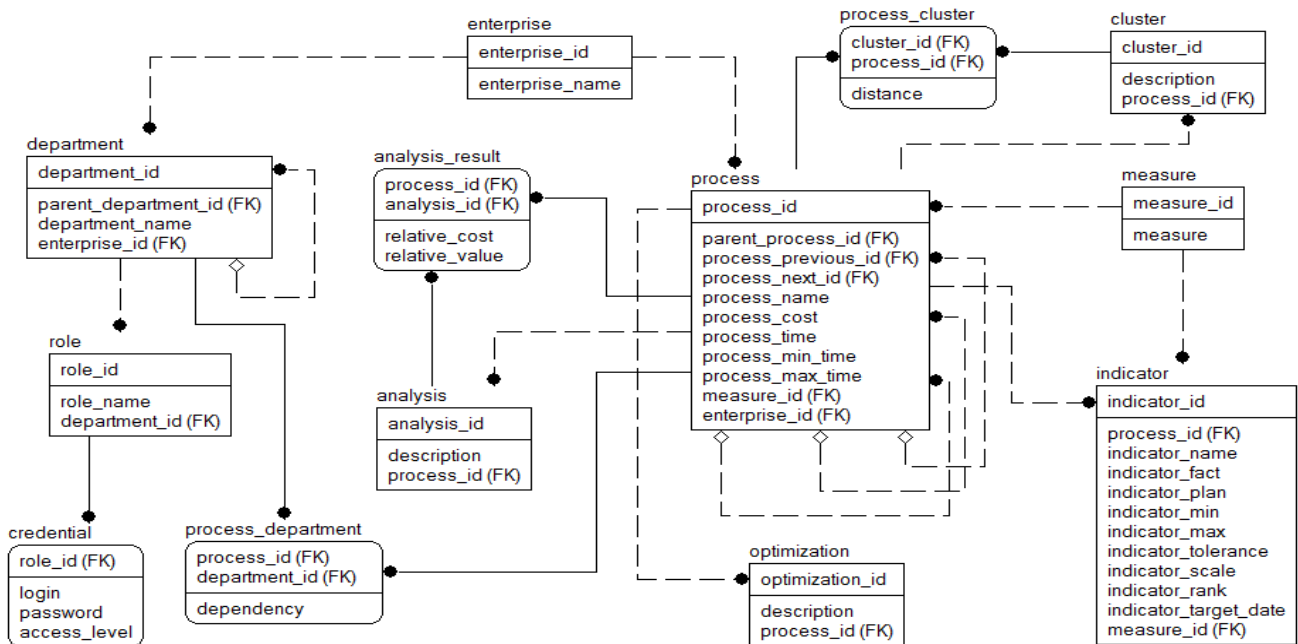


Рис. 2 – Фрагмент модели данных

**Контрольные расчеты и анализ полученных результатов.** Рассмотрим в качестве исходной модели бизнес-процесса модель «Поставка продукции».

Работы бизнес-процесса  $x_0$  «Поставка продукции»:

- $s_1$  – формирование заказа на поставку;
- $s_2$  – согласование с поставщиком сроков и формы оплаты;
- $s_3$  – доставка продукции;

- $s_4$  – прием поставленной продукции.

В результате преобразования модели в сеть Петри и ее выполнения, будет получено следующее множество маркировок сети (табл. 1).

Переходы  $t_i, i = \overline{1,4}$  построенной сети Петри (рис. 3) соответствуют работам  $s_i, i = \overline{1,4}$  модели бизнес-процесса «Поставка продукции», а позиции  $p_j, j = \overline{1,5}$  сети Петри – связям  $l_j, j = \overline{1,5}$  между работами:

- переходу  $t_1$  сети соответствует работа бизнес-процесса  $s_1$ ;
- переходу  $t_2$  сети соответствует работа бизнес-процесса  $s_2$ ;
- переходу  $t_3$  сети соответствует работа бизнес-процесса  $s_3$ ;
- переходу  $t_4$  сети соответствует работа бизнес-процесса  $s_4$ .

Для обеспечения моделирующих возможностей построенной сети Петри введены дополнительные позиции сети  $p_1$  и  $p_5$ , которые соответствуют началу и завершению цепочки процесса.

Таблица 1 – Множество маркировок сети Петри

Маркировка	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
0 (начальная)	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	1

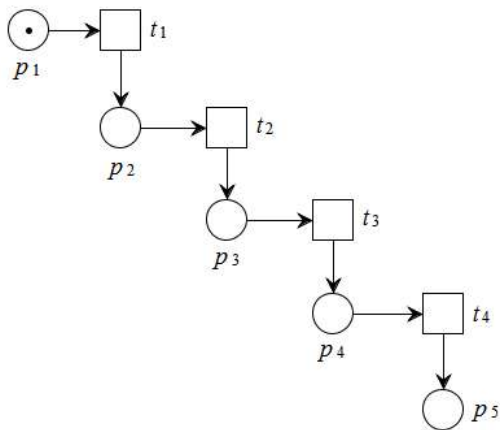


Рис. 3 – Графическое представление построенной сети

В результате проведения функционально-стоимостного анализа были получены следующие показатели значимости  $P^H$  работ (функций) бизнес-процесса и относительных затрат  $c^H$  на их выполнение (табл. 2).

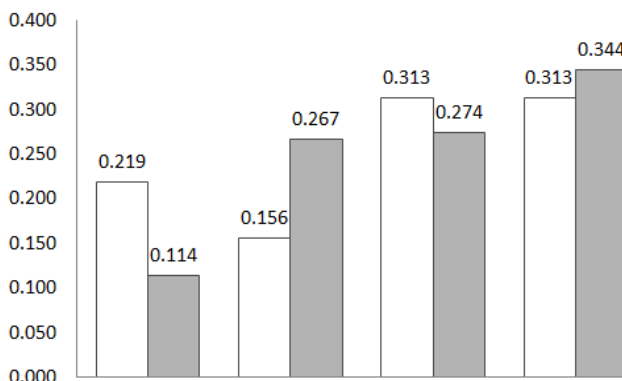


Рис. 4 – Исходная функционально-стоимостная диаграмма

Функционально-стоимостная диаграмма (рис. 4) наглядно демонстрирует баланс между значимостью работ (функций) бизнес-процесса и расходами на них.

Таблица 2 – Показатели работ бизнес-процесса

№	Работа	$\tau$	$c$	$P^H$	$c^H$
1	$s_1$	0,5	305,5	0,219	0,114
2	$s_2$	1	712,12	0,156	0,267
3	$s_3$	1	732,32	0,313	0,274
4	$s_4$	1	919,2	0,313	0,344

Анализ функционально-стоимостной диаграммы позволяет сделать выводы о том, что расходы на выполнение работ 1 и 2 не сбалансированы со значениями их значимости. Применим метод сетевого планирования (табл. 3), из результатов которого сформируем рекомендации:

- уменьшить стоимость выполнения работы 2 до 356,06 у.е., за счет увеличения продолжительности ее выполнения до 1,5 часов;
- уменьшить продолжительность выполнения работы 1 до 0,1 часа, за счет увеличения стоимости ее выполнения до 549,9 у.е.

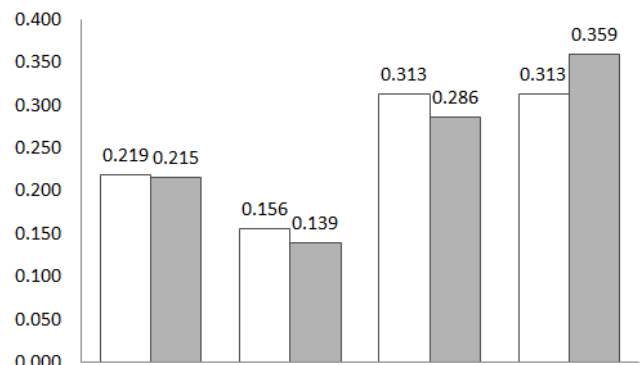


Рис. 5 – Диаграмма после оптимизации бизнес-процесса

Функционально-стоимостная диаграмма (рис. 5), построенная для оптимизированного бизнес-процесса демонстрирует установленный баланс между показателями значимости и относительными значениями стоимости работ (функций) бизнес-процесса.

Таблица 3 – Результаты метода сетевого планирования

№	Работа	$\tau^*$	$c^*$	$P^{H*}$	$c^{H*}$
1	$s_1$	0,1	549,9	0,219	0,215
2	$s_2$	1,5	356,06	0,156	0,139
3	$s_3$	1	732,32	0,313	0,286
4	$s_4$	1	919,2	0,313	0,359

Проведем отбор путем кластеризации моделей бизнес-процессов, наиболее удачных аналогов построения бизнес-процесса «Поставка продукции», которые могут быть использованы в качестве рекомендаций к перестройке данного бизнес-процесса.

Для этого проведем сравнение модели бизнес-процесса  $x_0$  «Поставка продукции» с моделями бизнес-процессов снабжения моделей SCOR (Supply-Chain Operations Reference) и Oracle Business Model.

Работы модели бизнес-процесса  $x_1$  снабжения референтной модели SCOR:

- $s_1$  – составление графика поставок продукции;
- $s_2$  – прием продукции;
- $s_3$  – проверка продукции;
- $s_4$  – перевозка продукции;
- $s_5$  – разрешение оплаты поставщику.

Работы модели бизнес-процесса  $x_2$  снабжения эталонной модели Oracle Business Model:

- $s_1$  – управление поставщиками;
- $s_2$  – размещение заказа;
- $s_3$  – утверждение заказа;
- $s_4$  – получение счетов-фактур;
- $s_5$  – оплата счетов.

Применим разработанное программное обеспечение для решения задачи кластеризации моделей бизнес-процессов и получим следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4 – Результаты кластеризации

Модель бизнес-процесса	$x_0$	$x_1$	$x_2$
$x_0$	0	0,232	0,562
$x_1$	0,232	0	0,33
$x_2$	0,562	0,33	0

Таким образом, на основе результатов кластеризации, можно сделать вывод о том, что рекомендованной эталонной моделью для перестройки бизнес-процесса «Поставка продукции» является модель бизнес-процесса поставки продукции референтной модели SCOR.

**Выводы.** В данной статье была рассмотрена задача поддержки процесса исследования и анализа бизнес-структуры предприятия.

**Копп Андрей Михайлович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (093) 796-09-54; e-mail: andrei.kopp@mail.ru.

**Копп Андрій Михайлович** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (093) 796-09-54; e-mail: andrei.kopp@mail.ru.

**Орловский Дмитрий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (050) 301-64-33; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

**Orlovskiy Dmytro Leonidovich** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; tel.: (050) 301-64-33; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

При обзоре задач моделирования, анализа и оптимизации бизнес-процессов, их места и роли в управлении предприятием были рассмотрены проблемы моделирования бизнес-процессов, место и роль моделирования бизнес-процессов в задачи анализа деятельности предприятия, вопросы, связанные с оптимизацией бизнес-процессов и основные подходы к ее проведению.

Для решения поставленной задачи и, в частности, ее составляющих были предложены к использованию соответствующие средства имитационного моделирования, математические модели и методы.

Была разработана база данных, программное обеспечение для работы с базой данных, и программное обеспечение, реализующее соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение решения поставленной задачи.

**Список литературы:** 1. *Хаммер М.* Реинжиниринг корпорации. Манифест революции в бизнесе / М. Хаммер, Д. Чампи. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 288 с. 2. *Хамидуллин Ф. Ф.* Оптимизация бизнес-процессов / Ф. Ф. Хамидуллин, А. К. Шалабанов, И. З. Сабиров, // Вестник ТИСБИ. – 2012. – № 3. – С. 5–16. 3. *Доррер М. Г.* Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри // Вестник СибГТУ. – 2010. – № 2. – С. 10–18. 4. *Щербakov В. А.* Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности предприятия в рыночной экономике. – Новосибирск: НГАВТ, 2012. – 216 с. 5. *Подоба В. А.* Экономико-математические методы и модели / В. А. Подоба, О. В. Баландина, А. Н. Кобылицкий. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. – 99 с. 6. *Кулаичев А. П.* Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hammer, M., D. Champi. *Reinzhining korporacii. Manifest revoljucii v biznese.* Moscow: Mann, Ivanov I Ferber, 2011. Print. 2. Hamidullin, F. F., A. K. Shalabanov and I. Z. Sabirov. "Optimizacija biznes-processov." *Vestnik TISBI.* No. 3. 2012. 5–16. Print. 3. Dorrer, M. G. "Algoritm preobrazovanija modelej biznes-processov v odnocvetnye seti Petri." *Vestnik SibGTU.* No. 2. 2010. 10–18. Print. 4. Shherbakov, V. A. *Kompleksnyj jekonomicheskij analiz hozjajstvennoj dejatel'nosti predprijatija v rynochnoj jekonomike.* Novosibirsk: NGAVT, 2012. Print. 5. Podoba, V. A., O. V. Balandina and A. N. Kobyl'ickij. *Jekonomiko-matematicheskie metody i modeli.* Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2011. Print. 6. Kulaichev, A. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannyh.* Moscow: INFRA-M, 2006. Print.

Поступила (received) 01.12.2015

**О. Є. ФЕДОРОВИЧ, Н. В. ЄРЕМЕНКО**

## УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИКОЮ В РІЗНОРІДНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

Вирішено завдання побудови методів і моделі інформаційної технології логістичного управління вантажопотоками в різномірних транспортних мережах при формуванні складних каналів доставки вантажів. Запропоновано метод розрахунку основних показників вантажоперевезень. Описано модель управління вантажоперевезеннями з використанням фракталів і агентного моделювання. Запропоновано послідовність формування фрактальної моделі управління. Побудовано архітектуру прикладної інформаційної технології логістичного управління вантажоперевезеннями.

**Ключові слова:** різномірна транспортна мережа, мультимодальні вантажоперевезення, пункт перевалки, складування, управління збутом, фрактали, агенти, інформаційна технологія.

**Вступ.** Глобалізація виробництва, ринків постачання і збуту продукції, а також необхідність забезпечення високої швидкості реагування на потреби ринку вимагають впровадження ефективних механізмів управління сучасним підприємством. Виникнення розподілених на великій території потоків сировини і матеріалів, готової продукції, а також розподіленість споживачів і постачальників, привели до необхідності вдосконалення системи планування, управління і контролю вантажопотоків з метою мінімізації витрат, пов'язаних з транспортуванням і складуванням [1, 2].

В даний час великі компанії і корпорації, пов'язані з масовим випуском продукції, використовують для доставки вантажів різні транспортні магістралі, що, зі свого боку потребує розробки методу для обґрунтування і вибору пунктів перевалки вантажів при стикуванні магістралей. При цьому перехід вантажів з однієї транспортної магістралі на іншу призводить до нових проблем і витрат, які необхідно враховувати в логістиці мультимодальних перевезень. Оптимізація цих витрат є актуальним завданням в логістиці доставки вантажів споживачам [3].

Крім того, ефективне функціонування підприємства неможливе без впровадження сучасної інформаційної технології управління, яка дасть змогу збільшити конкурентні переваги підприємства завдяки інформаційній підтримці супроводу каналів постачання і збуту продукції по всьому логістичному ланцюгу, оперативного управління окремими ланками і процесами постачання, збуту і доставки товарів, зменшення складських запасів, оптимізації термінів доставки, раціонального використання транспортних засобів і т. д.

Тому побудова методів і моделі інформаційної технології управління вантажоперевезеннями в умовах територіальної розподіленості учасників логістичного ланцюга, а також складних каналів доставки вантажів в різномірній транспортній мережі є актуальним.

**Мета роботи:** мінімізація витрат, пов'язаних з вантажоперевезеннями, шляхом створення методів і моделі прикладної інформаційної технології логістичного управління вантажопотоками в різномірній транспортній мережі.

**Постановка задачі.** В якості розподіленої логістичної системи дистрибуцій (РЛСД) в роботі розглядається логістична система, що містить крім виробників і споживачів продукції множини пунктів перевалки (ПП) і розподілу вантажів у різномірній

транспортній мережі, що формуються, якщо магістралі різномірної транспортної мережі знаходяться досить близько одна від одної або їх поєднано на одній площі. Розглянуто можливі варіанти реалізації ПП, що пов'язані з доставкою вантажу по одній транспортній магістралі та переходом (додаткове транспортування; складування; перевалка) на іншу транспортну магістраль. Вирішено два типи ПП:

– стаціонарні ПП, призначені для складування, зберігання і перевалки продукції, в якості яких можуть використовуватися розподільчі центри дистрибуції (РЦД);

– тимчасові ПП, призначені для перевалки вантажів в різномірній транспортній мережі, коли різні магістралі знаходяться досить близько одна від одної або їх поєднано на одній площі. У цьому випадку, як можливий варіант, можуть бути використані вузли транспортної мережі.

Розглянутий в статті об'єкт є складною системою, що постійно змінюється і розвивається, та пов'язаний з використанням різномірних елементів при побудові структури системи, необхідністю стикування різних транспортних систем і складною динамікою вантажопотоків, канали яких формуються шляхом інтеграції каналів окремих мереж. У зв'язку з цим виникає необхідність аналізу структурного, динамічного та управлінського аспектів системи, які дозволять комплексно оцінити ефективність за допомогою запропонованих показників і дати рекомендації для планування, модернізації та управління каналами збуту.

**Результати дослідження.** Вирішення задачі формування структури каналів доставки вантажів складається з кількох етапів.

1. Обґрунтування використання стаціонарних ПП для місць складування, зберігання і перевалки вантажів. Для цього необхідно провести:

а) сегментацію споживачів готової продукції, що здійснюється з використанням кластерного аналізу (рис. 1). Аналіз показав, що складність управління вантажними потоками в розподіленому логістичному ланцюзі значною мірою обумовлена територіальною розподіленістю основних її учасників (постачальників, виробників і споживачів), а також інтенсивністю споживання продукції кінцевими споживачами, яка визначає періодичність поставок, а, отже, і вартість перевезень. Тому сегментація проводилася на основі

аналізу інтенсивності споживання продукції та територіальної близькості споживачів з використанням кластерного аналізу з метою формування множини альтернативних варіантів розміщення місць зберігання та складування продукції. Результатом проведеної сегментації є сформована множина кластерів, центри розсіювання яких являють собою альтернативні варіанти розміщення РЦД;

б) порівняння варіантів з множини альтернатив (можливих варіантів розміщення РЦД, отриманих раніше) на основі багатокритеріальної оптимізації в умовах можливої нечіткості вхідних даних (рис. 2). Застосування нечіткого ранжування (оцінювання сту-

пеня важливості / відповідності критеріїв та альтернатив з допомогою нечіткої функції приналежності) дало змогу застосувати метод як для кількісних, так і для якісних критеріїв. Перевагою запропонованого методу є виявлення одночасно як найкращого, так і найгіршого варіантів розташування РЦД. Передбачено, що компромісний варіант має бути найбільш близьким до позитивного (ідеального) рішення і знаходитися на допустимій відстані від негативного (гіршого) рішення. Унаслідок вирішення задачі множини альтернативних місць розміщення РЦД було проранжовано за заданими критеріями й виділено найкращі варіанти розміщення РЦД.

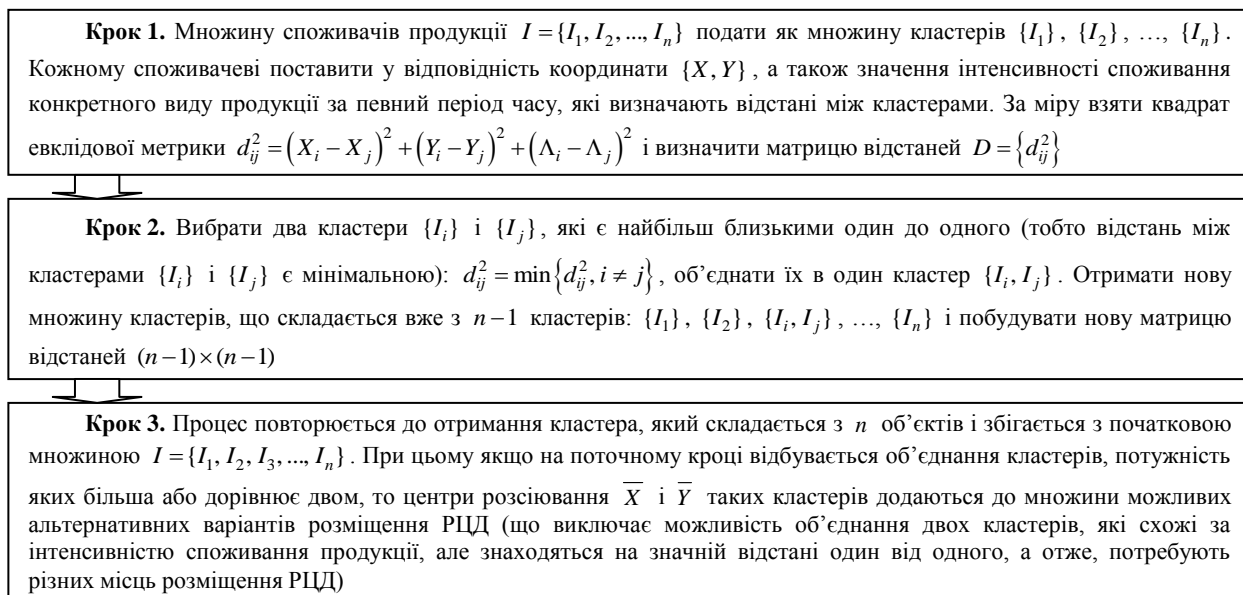


Рис. 1 – Послідовність кластеризації кінцевих споживачів

2. Обґрунтування ПП, призначених для стикування різних транспортних магістралей із застосуванням методу цілочислового лінійного програмування та багатокритеріальної оптимізації для мінімізації логістичних витрат. Для оцінювання логістичних витрат при стикуванні різних транспортних магістралей було введено такі показники: вартість оренди площі для організації ПП ( $A$ ); вартість технологічного обладнання для формування ПП ( $B$ ); вартість робіт, пов'язаних зі створенням або модернізацією ПП ( $C$ ); витрати на персонал ПП ( $D$ ); ризики, пов'язані з організацією ПП ( $E$ ); час, витрачений на перевантаження ( $F$ ) одиниці вантажу (наприклад, контейнер); обсяг перевезеного вантажу ( $V$ ). Запропоновано багатокритеріальну постановку задачі оптимізації витрат, пов'язаних зі стикуванням різних транспортних магістралей при використанні ПП з уведенням комплексного критерію  $W$  для оцінювання витрат на основі методу ідеальної точки з урахуванням обмеження на обсяг вантажів, який необхідно доставити споживачу (не менше за встановлене значення). У цьому випадку кожному варіанту  $S_i$  розміщення ПП ставиться у відповідність набір оцінок за виділеними показниками  $S_i = \{A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, V_i\}$  та вводиться поняття ідеальної точки  $S = \{A^-, B^-, C^-, D^-, E^-, F^-, V^-\}$ , для якої

оцінки по всім виділеним показникам є найкращими. Тоді узагальнений критерій буде мати такий вигляд [4]:

$$W = \left( \alpha_A (A_i - A^-)^p + \alpha_B (B_i - B^-)^p + \alpha_C (C_i - C^-)^p + \alpha_D (D_i - D^-)^p + \alpha_E (E_i - E^-)^p + \alpha_F (F_i - F^-)^p + \alpha_V (V^- - V_i)^p \right)^{1/p},$$

де  $p = 1, 2, 3, \dots$ ;

$\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \alpha_D, \alpha_E, \alpha_F, \alpha_V$  – «ваги» (значущість) показників, які оцінюються з допомогою експертів,  $\sum_{k=1}^7 \alpha_k = 1$ .

Найкращим варіантом організації каналів збуту (з використанням ПП для стикування різних транспортних мереж) є варіант, для якого значення комплексного критерію  $W$  буде мінімальним.

3. Структурний аналіз, який полягає в перерахуванні варіантів каналів доставки вантажів з урахуванням можливих типів розподільчих центрів, а також рівнів мережі (регіональний і мультирегіональний) із застосуванням методів теорії перерахування та розміщення РЦД пов'язана з різною топологією

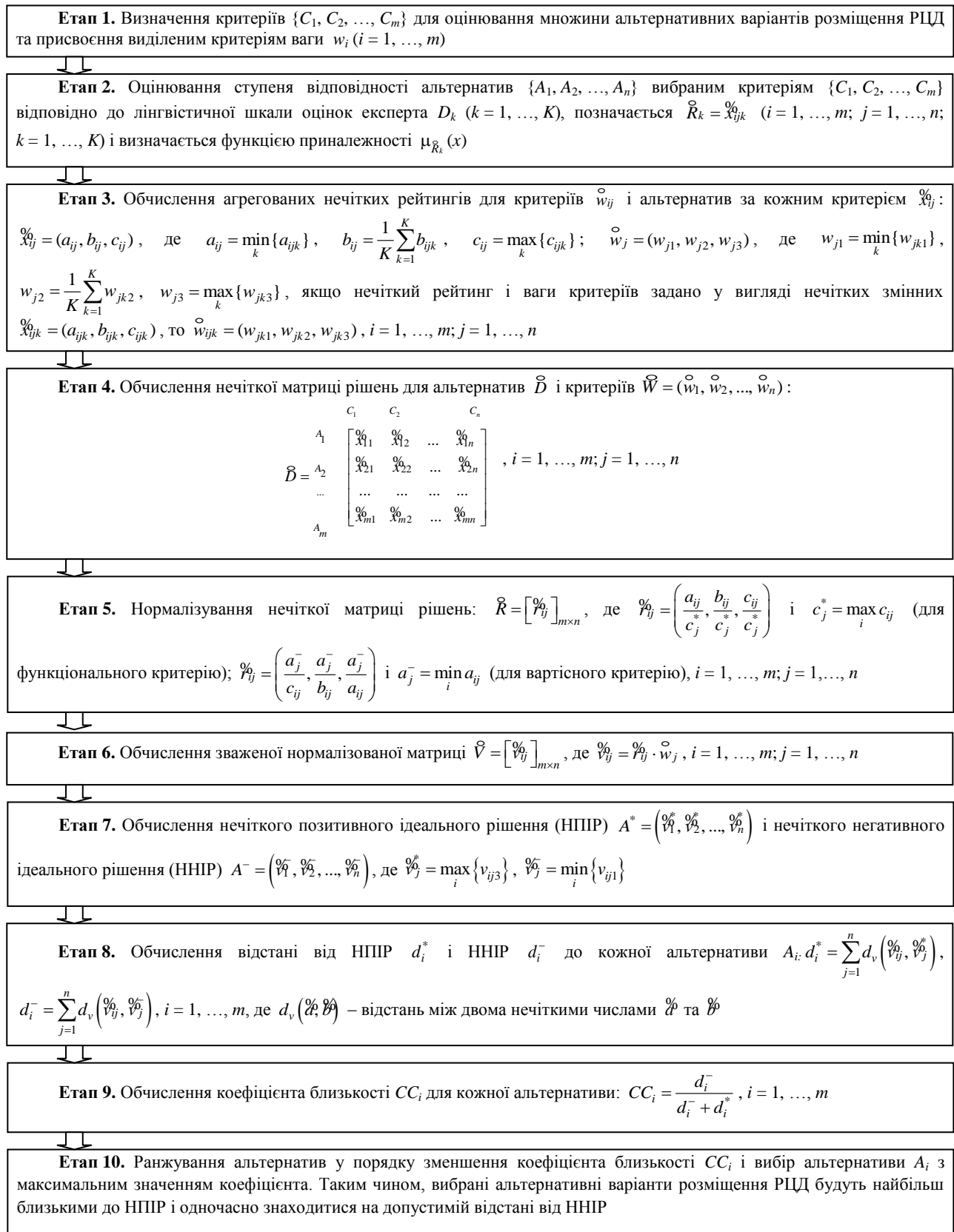


Рис. 2 – Етапи методу багатокритеріальної оптимізації в умовах нечіткості вхідних даних

транспортних мереж, а також типами РЦД, що використовуються для розрахунку можливих варіантів структури каналів вантажоперевезень. При цьому вирішено такі задачі [5, 6]:

а) перераховано варіанти формування каналів збуту з урахуванням наявних РЦД, зафіксованих у вузлах різномірної транспортної мережі;

б) перераховано можливі варіанти для побудови нових каналів збуту (модернізації існуючих) з можливим розміщенням РЦД на мультирегіональному й регіональному рівнях з урахуванням типів ПП.

З метою проведення аналізу динамічних аспектів РЛСД розроблено метод розрахунку основних показників вантажоперевезень в різномірній транспортній мережі з використанням багатофазної моделі системи масового обслуговування (СМО) [7]. Метод враховує інтенсивності вантажопотоків у транспортному обслуговуванні, що дає змогу розрахувати планові показники збуту продукції [8].

Канал збуту продукції формується як траєкторія руху вантажів від виробника до кінцевих споживачів через множину РЦД і ПП з урахуванням доступних транспортних магістралей. При цьому можливими є два варіанти конфігурації структури каналів збуту продукції:

– кожен ПП (стаціонарний або тимчасовий) пов'язаний з кожним кінцевим споживачем; у такій системі майже не виникає дефіцит продукції на складах для відвантаження споживачам;

– РЛСД являє собою розподілену систему; у цьому випадку її можна описати з допомогою СМО, у якій потік замовлень (заявки на продукцію) має обмежені засоби для їх задоволення (обмежений обсяг запасів товарів, що зберігаються в РЦД).

Дослідження проводилося для різних рівнів подання каналів збуту продукції:

а) на регіональному рівні РЦД можна подати у вигляді пунктів перевалки вантажів з  $k$ -ї на  $(k+1)$  транспортну магістраль. Для моделювання вантажних потоків у цьому випадку застосовано Марківську модель розмноження й загибелі зі станами  $(n, k)$ ,  $0 \leq n \leq N$ ,  $0 \leq k \leq S$ , де  $n$  – кількість споживачів, що обслуговуються поточним РЦД;  $k$  – кількість продукції, що зберігається на складі і яку може бути відвантажено споживачам. Для стаціонарного стану отримано такі показники: рівень запасів; кількість затриманих замовлень (унаслідок відсутності товару на складі); кількість заявок у системі; час очікування; та ін.;

б) на мультирегіональному рівні крім використовуваних для складування РЦД для доставки вантажів кінцевим споживачам уводяться додаткові ПП, що забезпечують стиковку різних транспортних магістралей. Наявність додаткових ПП, кожен з яких має свою інтенсивність оброблення вантажів, що надходять, дає змогу подати РЛСД як багатофазну систему і застосувати відповідні методи розрахунку СМО. У розділі наведено розрахунок часових показників багатофазної моделі для послідовних каналів. Розрахунок транспортної мережі, що складається з однакових (ланки, які мають однакову інтенсивність  $\mu$  оброблення заявок в системі) або різних (інтенсивності  $\mu_i$  оброблення заявок в системі відмінні) ланок, проводиться за спрощеною схемою, у якій кожна ланка розраховується окремо, оскільки для простоти розрахунків передбачається, що ланки одна на одну не впливають. Запропонований метод дав змогу визначити щільності  $f(t)$  і функції  $F(t)$  розподілу часу перебування заявки в системі для таких випадків:

1) ПП мають однакову інтенсивність обслуговування:

$$f(t) = \frac{c(ct)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-ct},$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = - \sum_{i=1}^n \frac{c(ct)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-ct} \Big|_0^t = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{c(ct)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-ct};$$

2) інтенсивність обслуговування ПП є різною:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-c_i t},$$

де  $A_i = \frac{\prod_{j=1}^n c_j}{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (c_i - c_k)}$ ;

$n$  – кількість ланок у системі;

$$F(t) = \prod_{i=1}^n c_i \sum_{j=1}^n \frac{e^{-c_j t} - 1}{\prod_{\substack{j,k,m=1 \\ k>m \\ k=j \text{ або } m=j}}^n (-1)^{j+1} c_j (c_k - c_m)}$$

3) змішаний випадок:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_{ij} t^{(n_i-j)}}{(n_i-j)!} e^{-c_i t},$$

де  $A_{ij} = \frac{1}{(j-1)!} \frac{\partial^{j-1}}{\partial s^{j-1}} \left[ (s + c_i)^{n_i} B(s) \right]_{s=c_i}$ ;

$$F(t) = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_{ij}}{(n_i-j)!} \int_0^t t^{(n_i-j)} e^{-c_i t} dt = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_{ij}}{(n_i-j)!} \left( \frac{t^{(n_i-j)} e^{-c_i t}}{-c_i} + \frac{n_i-j}{c_i} \int_0^t t^{(n_i-j)-1} e^{-c_i t} dt \right),$$

де  $B(s)$  – перетворення щільності розподілу часу перебування заявки в системі з константою  $c = \mu(1-\rho)$  (для однакових ланок) або  $c_i = \mu_i(1-\rho_i)$  (для різних ланок) за Лапласом;

$\lambda$  – інтенсивність надходження заявок в системі;

$\rho$  – завантаження в одній ланці,  $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ ,  $\rho_i = \frac{\lambda}{\mu_i}$ ;

$s$  – змінна диференціювання.

Отримані результати було використано при визначенні середніх значень часових показників транспортування вантажів від виробника до кінцевих споживачів через РЦД і ПП, зокрема, повний час проходження заявки в системі визначає час доставки товарів споживачам, сумарний час очікування визначає час «пролежування» товарів на складі перед відправкою споживачам.

Для створення моделі управління вантажоперевезеннями в різномірній транспортній мережі було використано агентну й фрактальну моделі. Під фрак-



талами в роботі розуміється множина самоподібних агентів, що додає до основних властивостей фракталів (самоподоба, самоорганізація, самооптимізація, орієнтація на мету, динамічність) ще й такі важливі характеристики агентів, як автономність, мобільність і кооперативність, що підвищує ефективність системи управління вантажоперевезеннями [9].

Для формування моделі управління вантажоперевезеннями в різномірній транспортній мережі було сформовано склад агентів для побудови алгоритму управління системою. За основу запропонованої фрактальної архітектури було взято п'ять функціональних модулів: репортер, спостерігач, організатор, аналізатор і резольвер. Спостерігач і репортер є керуючими модулями і контролюють вхідну і вихідну інформацію фракталів (наприклад, інформація про замовлення, терміни доставки, тощо). Організатор перевіряє фрактальні статуси (цілі) і управляє фрактальною структурою (додавання або видалення фракталів, що може бути пов'язано, наприклад, з виникненням нових каналів збуту або поставок продукції або, навпаки, з відмовою від будь-яких каналів). Найбільш важливе значення серед усіх функціональних модулів з управління ланцюгами поставок у фрактальній моделі мають аналізатор і резольвер, які являють собою модулі, що використовуються в управлінні. Так, аналізатор містить агенти, призначені для симуляції і планування. Основною його функцією є аналіз і розрахунок прибутковості фракталу на основі його цільового призначення та вартісної інформації. Після проведення вартісного аналізу аналізатор об'єднує отриману інформацію і передає її резольверу для подальшої оптимізації. Резольвер контролює взаємодію між фракталами з урахуванням сформованих цілей для прийняття управлінських рішень.

Розроблену модель управління ланцюгами поставок орієнтовано на досягнення заданої мети, тому ключовим моментом при організації управління є опис процесу формування мети функціонування всієї системи, яка являє собою інтеграцію цілей фракталів нижніх рівнів (підфракталів):

$$g_f = g_1 \oplus g_2 \oplus g_3 \dots \oplus g_n \oplus F_f,$$

де  $g_i$  – мета підфракталу  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ );

$F_f$  – власна мета фракталу  $f$ .

Після того як систему цілей підфракталів створено, ініціюється процес їх гармонізації, який полягає у вирішенні можливих конфліктних ситуацій між підфракталами. Такий процес є зворотним відносно процесу формування цілей.

Цільову модель управління фрактальної системи спрямовано на максимізацію прибутку  $P_f$ , одержуваного від фракталу  $f$ :

$$\max P_f = \sum_{i=1}^n P_i - C^f,$$

де  $P_i$  – прибуток підфракталу  $i$ ;

$C^f$  – логістичні витрати для фрактала  $f$ .

Формування фрактальної моделі управління (рис. 3) складається з послідовності кроків:

- 1) подати кожен компонент РЛСД як фрактал;
- 2) визначити базові відношення типу виробник – постачальник між фракталами й відокремити фрактали, які реалізують ці відношення;
- 3) якщо на кроці 2 отримано фрактал, що відображає структуру РЛСД цілком, то формування фрактальної структури завершити, інакше – повернутися до кроку 2.

В отриманій таким чином моделі управління вантажоперевезеннями ієрархія фракталів відповідає ієрархії логістичного ланцюга.

Розроблені методи і модель було використано як математичний інструментарій для створення прикладної інформаційної технології логістичного управління вантажоперевезеннями (ПТЛУВ) в різномірній транспортній мережі (рис. 4).

При створенні прикладної ІТ використано основні теоретичні результати проведеного дослідження. З допомогою прикладної ІТ менеджер транспортної логістики формує системне подання каналів вантажоперевезень і процесів управління. Далі використовується метод для формування структури каналів доставки вантажів, а також проводиться аналіз можливих варіантів структур. З допомогою розроблених методів розрахунку, визначаються основні показники вантажоперевезень.

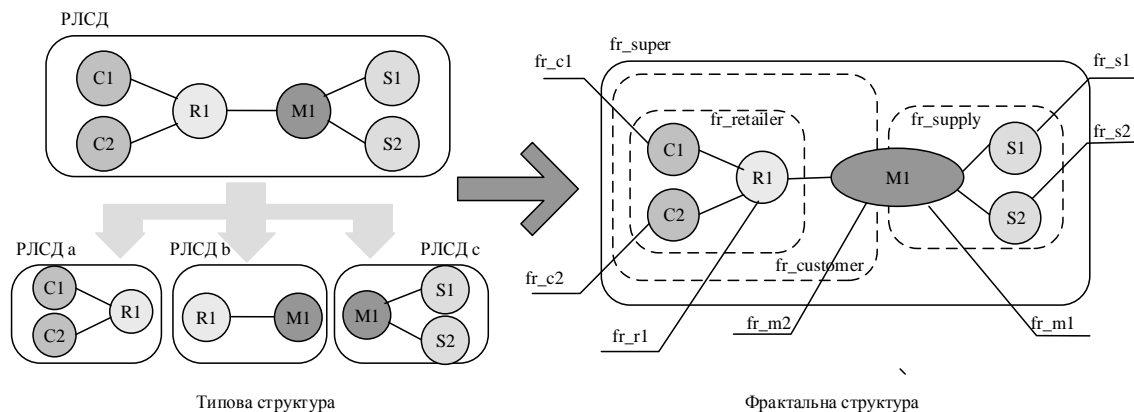


Рис. 3 – Формування фрактальної моделі управління

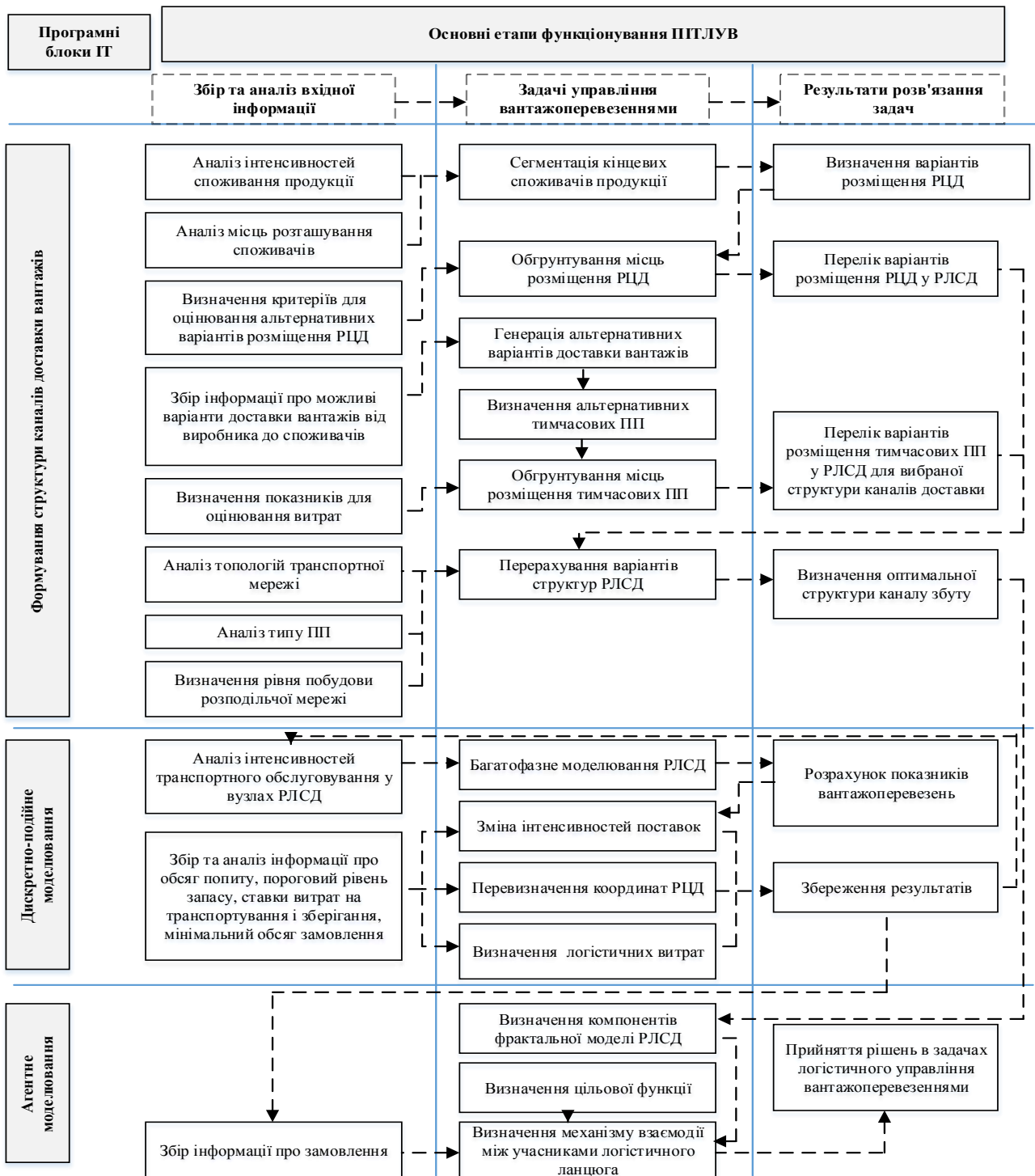


Рис. 4 – Схема ПІТЛУВ в різномірній транспортній мережі

Для управління вантажоперевезеннями використовується розроблена модель управління, що базується на фрактальному моделюванні та агентній технології.

**Висновки.** Узагальнені результати, одержані у ході дослідження, дають можливість сформулювати основні висновки роботи.

1. Розроблено метод формування структури каналів доставки вантажів в різномірній транспортній мережі, який дає змогу обґрунтувати використання місць складування і пунктів перевалки вантажів в

різномірній транспортній мережі на основі сегментації ринку збуту з використанням багатокритеріальної оптимізації, нечіткої логіки і теорії перерахування.

2. Запропоновано кластеризацію множини споживачів, де враховано інтенсивність споживання продукції, а також їх територіальну розподіленість, що дає змогу визначити місця розміщення основних складових, які необхідні для стиковки різних транспортних магістралей (додаткові навантаження-розвантаження, місця складування, спеціалізований транспорт для перевалки тощо).

3. Проведено структурний аналіз розподіленої системи вантажоперевезень із застосуванням методів теорії перерахування та комбінаторики, який дає змогу сформулювати альтернативні варіанти для обґрунтування вибору каналів вантажоперевезень в різно-рідній мережі. При цьому враховуються можливі типи розподільчих центрів, типи перевалок, а також топологія транспортної мережі як на регіональному, так і на мультирегіональному рівнях.

4. Запропоновано метод розрахунку основних показників вантажоперевезень на основі багатофазної моделі СМО, в якому розглянуто фази руху вантажів по каналах доставки, при цьому розраховуються основні статистичні показники вантажопотоків.

5. Розроблено модель управління вантажоперевезеннями, що базується на теорії фракталів та агентному моделюванні, у якій ієрархія фракталів відповідає ієрархії логістичного ланцюга, що дає змогу отримати адекватне подання управляючих впливів на кожному етапі управління вантажоперевезеннями з урахуванням можливих конфліктних ситуацій та заданих сценаріїв. Запропонована структура управління відповідає вимогам логістики та дозволяє вирішити такі задачі управління, як планування та контроль управління вантажоперевезеннями.

6. Розроблено ПІТЛУВ, яка включає розроблені методи та модель та яку може бути використано менеджерами підприємств та транспортними операторами. За допомогою запропонованої інформаційної технології формуються канали збуту продукції, оцінюються терміни перевезень, мінімізуються транспортні витрати, обґрунтовується розміщення складів, пунктів розподілу та перевалок.

Подальший розвиток розробленої прикладної інформаційної технології логістичного управління вантажоперевезеннями пов'язано з використанням її не тільки для перевезень національного рівня, а також міжнародних перевезень.

**Список літератури:** 1. *Годлевский, М. Д.* Формирование участников логистической сети цепочек поставок при стратегическом управлении [Текст] / *М. Д. Годлевский, А. А. Станкевич, Л. С. Чернявская, Э. Е. Рубин* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 27–34. 2. *Christopher, M.* Logistics & Supply Chain Management [Text] / *M. Christopher*. – Great Britain : Pearson Education Limited,

2011. – 276 p. 3. *Федорович, О. Е.* Геораспределенная производственная система. Размещение на земной поверхности, оптимизация магистральных систем, космический мониторинг [Текст] : монография / *О. Е. Федорович, В. М. Илюшко, Л. Д. Греков*. – Х. : Национальный аэрокосмический университет им. М. С. Жуковского «ХАИ». – 2014. – 206 с. 4. *Еременко, Н. В.* Моделирование взаимодействия разнородных транспортных систем в логистике грузоперевозок [Текст] / *Н. В. Еременко, В. А. Пуйденко* // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 3 (67). – С. 133–136. 5. *Федорович, О. Е.* Перечисление множества вариантов логистической сети распределительных центров сбыта продукции [Текст] / *О. Е. Федорович, Н. В. Еременко* // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. // М-во освіти і науки України, Харк. ун-т Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – 2014. – Вип. 9 (125). – С. 205–208. 6. *Федорович, О. Е.* Модели оптимизации и конфигурирования логистической системы дистрибуций [Текст] / *О. Е. Федорович, К. О. Западня, Н. В. Еременко* // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 4 (63). – С. 121–124. 7. *Клейнрок, Л.* Теория массового обслуживания [Текст] : пер. с англ. / *Л. Клейнрок*. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с. 8. *Еременко, Н. В.* Многофазное моделирование сложных распределенных логистических систем [Текст] / *Н. В. Еременко* // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 4 (68). – С. 157–162. 9. *Ryu, K.* Agent-based fractal architecture and modeling for developing distributed manufacturing systems [Text] / *K. Ryu, M. Jung* // *Int J Prod Res*. – 2003. – № 7 (41). – P. 33–55.

**Bibliography (transliterated):** 1. Godlevskij, et al. "Formirovanie uchastnikov logisticheskoy seti cepochek postavok pri strategicheskome upravlenii." *Visnyk NTU "HPI"*. No. 3 (977). 2013. 27–34. Print. 2. Christopher, M. *Logistics & Supply Chain Management*. Great Britain: Pearson Education Limited, 2011. Print. 3. Fedorovich, O. E., V. M. Iljushko and L. D. Grekov. *Georaspredeleonnaja proizvodstvennaja sistema. Razmeshhenie na zemnoj poverhnosti, optimizacija magistral'nyh sistem, kosmicheskij monitoring*. Kharkiv: Natsional'nyu aerokosmichnyy universytet im. M. Ye. Zhukovsk'oho "KhAI", 2014. Print. 4. Eremenko, N. V., and V. A. Pujdenko. "Modelirovanie vzaimodejstvija raznorodnyh transportnyh sistem v logistike gruzoperevozok." *Radioelektronni i komp'yuterni systemy* 3.67 (2014): 133–136. Print. 5. Fedorovich, O. E., and N. V. Eremenko. "Perechislenie mnozhestva variantov logisticheskoy seti raspredelitel'nyh centrov sbyta produkcii." *Sistemy obrobky informatsiy*. No. 9 (125). Kharkiv: Khark. un-t Povitryanykh Syl im. I. Kozheduba, 2014. 205–208. Print. 6. Fedorovich, O. E., K. O. Zapadnja and N. V. Eremenko. "Modeli optimizacii i konfigurirovanija logisticheskoy sistemy distrib'ucij." *Radioelektronni i komp'yuterni systemy* 4.63 (2013): 121–124. Print. 7. Klejnrok, L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Moscow: Mashinostroenie, 1979. Print. 8. Eremenko, N. V. "Mnogofaznoe modelirovanie slozhnyh raspredelennyh logisticheskikh sistem." *Radioelektronni i komp'yuterni systemy* 4.68 (2014): 157–162. Print. 9. Ryu, K. "Agent-based fractal architecture and modeling for developing distributed manufacturing systems." *Int J Prod Res* 7.41 (2003): 33–55. Print.

Надійшла (received) 05.12.2015

**Федорович Олег Євгенович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ»; тел.: (057) 788-42-51; e-mail: k302@d3.khai.edu.

**Fedorovych Oleh Yevhenovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Information Control Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; tel.: (057) 788-42-51; e-mail: k302@d3.khai.edu.

**Еременко Наталія Валентинівна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри інформаційних управляючих систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ»; тел.: (050) 835-61-77; e-mail: khai302@ukr.net.

**Yeremenko Nataliya Valentynivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Research Associate of Information Control Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; tel.: (050) 835-61-77; e-mail: khai302@iukr.net.

## РЕФЕРАТИ

УДК 004.9

**Динамическая модель планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, Э. Е. Рубин, А. А. Голоскокова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 3–6. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонується модель середньострокового планування (динамічна постановка задачі) поліпшення якості процесу розробки програмного забезпечення на основі технології СММІ (capability maturity model integration), що представляє собою модель зрілості. Використано функції корисності двох груп критеріїв: ступеня досягнення цільового профайла і ресурсного забезпечення (фінансова і часова складові). Розв'язання даної задачі визначає цільовий профайл, який в подальшому складе основу статичної постановки задачі.

**Ключові слова:** якість, модель зрілості, функція корисності, цільовий профайл, динамічна модель.

УДК 681.518:658.512

**Методи та інструментальні засоби для керування динамічним каталогом вимог у гнучких процесах розробки програмного забезпечення / М. В. Ткачук, Р. А. Гамзасв, І. О. Мартінкус, С. Д. Янушкевич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 7–13. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонуються підхід керування динамічним каталогом вимог при гнучкому методі розробки програмного забезпечення. Як приклад розглянуто Scrum методологію гнучкої розробки програмного забезпечення. Розглянуто методи вирішення даної проблеми. Для реалізації методу використовується комбінація латентно-семантичного аналізу та методу аналізу ієрархій для вирішення проблеми дуплікації даних, і можливих логічних конфліктів. Крім цього запропоноване рішення підтримує процедуру прийняття рішень для пріоретизації вимог залежності від призначення програмного продукту. Ефективність запропонованого методу перевірена тестовим прикладом.

**Ключові слова:** гнучкі методології, латентно-семантичний аналіз, динамічний каталог вимог, метод аналізу ієрархій.

УДК 004.822

**Логіко-лінгвістична модель ідентифікації семантично еквівалентних колокацій / С. В. Петрасова, Н. Ф. Хайрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 14–17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонується логіко-лінгвістична модель ідентифікації семантично близьких колокацій. Для автоматичного визначення семантичної кореляції еквівалентності між колокатами використано метод компонентного аналізу. У запропонованій моделі для формалізації семантично близьких колокацій визначено множини семантико-граматичних характеристик колокатів, відношення між якими описані з використанням базового апарату алгебри предикатів. Зроблено висновки про необхідність врахування як синтаксичної, так і семантичної інформації про лексичні одиниці, що дозволить підвищити ефективність семантичної обробки текстів.

**Ключові слова:** семантично близькі колокації, кореляція еквівалентності, колокати, метод компонентного аналізу, семантико-граматичні характеристики, апарат алгебри предикатів.

УДК 519.235

**Показатели степени связи между номинальными признаками / О. М. Безменова, І. П. Гамаюн, М. І. Безменов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 18–24. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглядається проблема оцінювання ступеня зв'язку між параметрами, вимірюваними в шкалі найменувань. Запропоновано показники ступеня зв'язку, засновані на максимізації ймовірності правильного передбачення значення одного параметра за значенням іншого. Побудовано показники, орієнтовані на лінійну залежність від ймовірностей окремих значень, а також показники з еліптичною залежністю. На основі запропонованих показників сформовані коефіцієнти зв'язку. Отримано оцінки запропонованих показників ступеня зв'язку, що базуються на принципі максимальної правдоподібності. Зроблено висновки про можливість використання запропонованих показників ступеня зв'язку при розв'язанні задач групування параметрів і класифікації об'єктів.

**Ключові слова:** ступінь зв'язку, параметр, шкала найменувань, показник ступеня зв'язку, коефіцієнт зв'язку, лінійна залежність, еліптична залежність, принцип максимальної правдоподібності.

УДК 681.5

**Структурний та параметричний синтез системи стабілізації квазістатичного технологічного процесу / О. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. І. Товаянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (948). – С. 25–28. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонується один з можливих підходів до синтезу регулятора стану технологічного процесу, математична модель якого представлена у вигляді системи трансцендентних рівнянь, що зв'язують входи і виходи технологічного процесу. Метою роботи є адаптація методів сучасної теорії управління до управління квазістатичними процесами. Детально розглянуто лінійний випадок взаємозв'язку «вхід-вихід» і квадратичний критерій якості процесу стабілізації стану технологічного процесу.

**Ключові слова:** технологічний процес, система стабілізації, лінійно-квадратична задача, квазістатична математична модель, теорія управління.

УДК 629.423.3

**Управління потоком потужності в тяговому приводі електропоїзда при живленні від контактної мережі та інерційних накопичувачів енергії / В. П. Северин, Л. В. Оверьянова, О. В. Омеляненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 29–32. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглядається приміський електропоїзд з асинхронними тяговими двигунами і бортовими накопичувачами енергії. Запропоновано систему управління перетіканням потужності в тяговому приводі, що досліджується, з накопичувачем при живленні від контактної мережі. Показана стратегія системи управління, яка полягає у забезпеченні компенсації надлишків чи браку потужності тягового інвертора за рахунок управління струмом накопичувача. Запропонована система управління потоком потужності дозволить рекуперувати енергію в накопичувач до повної зупинки електрорухомого складу.

**Ключові слова:** приміський електропоїзд, асинхронний електродвигун, електромеханічний інерційний накопичувач енергії, тяговий інвертор, DC-DC перетворювач, система управління.

УДК 621.384.6

**Использование спадающего магнитного поля соленоида для управления параметрами электронного пучка, формируемого магнетронной пушкой / А. С. Мазманишвили, Н. Г. Решетняк, А. Ю. Сидоренко, И. А. Чертищев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:**

Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 33–37. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Представлено результати досліджень і розрахунків з формування та управління радіального електронного пучка магнетронною гарматою зі вторинноемісійним катодом в діапазоні енергій електронів 35...65 кеВ, і вимірювання його параметрів при транспортуванні в сумарному спадаючому магнітному полі соленоїда і поля керуючого магніту. Наводяться результати чисельного моделювання руху трубчастого електронного потоку. Показано, що при обраних початкових умовах для пучка електронів і розподілів поздовжнього магнітного поля уздовж осі гармати і каналу транспортування потік електронів потрапляє на вертикальну ділянку, довжина якої близько сантиметра. Показана можливість регулювання місця влучення пучка на вертикальну стінку при варіативності амплітуди керуючого магнітного поля.

**Ключові слова:** електронний пучок, магнетрона гармата, магнітне поле, чисельне моделювання електронного потоку, управління радіального електронного пучка.

УДК 621.3.078.001

**Параметричний синтез цифрової системи наведення танкової зенітної установки / Т. Є. Александрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 37–40. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглядається задача відшукування значень варіюваних параметрів системи наведення танкової зенітної установки закритого типу, в якій зенітний кулемет встановлений на обертовій командирській башточці, а наведення кулемета на повітряні і наземні цілі здійснюється з командирської башточки за допомогою пульта наведення, пов'язаного з електроприводом імпульсного регулювання. Показано, що якість роботи системи наведення оцінюється точністю підтримки заданої кутової швидкості наведення, швидкодією та енергетичними затратами на наведення.

**Ключові слова:** танкова зенітна установка, імпульсна система регулювання, точність, швидкодія, енергетичні витрати на наведення.

УДК 004.3'12:621.396.6-027.31:004.3'124

**Влияние конструкции радиоэлектронной аппаратуры на начало регулярного теплового режима / В. И. Азаренков, И. М. Майко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 41–47. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0023.**

Наведено розрахункові залежності рішення рівняння теплопровідності при граничних умов III роду. Дана оцінка результатів розрахунків за отриманими графічними даними шляхом порівняння їх з результатами розрахунків за аналітичними залежностями і з експериментальними даними про вплив конструкції радіоелектронної апаратури на початок регулярного теплового режиму. Показано, що результати дослідження можуть бути поширені на рішення рівняння теплопровідності анізотропного тіла з внутрішніми джерелами енергії.

**Ключові слова:** математична модель, теплова модель, теплове поле, температурне поле, радіоелектронна апаратура, тепловий режим, регулярний тепловий режим.

УДК 519.2+539.1

**Алгоритм повышения порядка стационарного стохастического марковского поля на плоскости / А. С. Мазмишвили, А. Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 48–51. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Алгоритм генерування випадкового двовимірного об'єкту на площині застосовується при моделюванні руху транспортних засобів та при вирішенні інших задач, при розв'язанні яких потрібно використовувати марківські випадкові поля другого порядку. Синтезовано алгоритм побудови двовимірного дійсного нормального марківського поля другого порядку, будь-які ортогональні перерізи якого є стаціонарними випадковими процесами Орнштейна-Уленбека. Показано, що запропонований підхід дозволяє синтезувати марківські випадкові поля і більш високого порядку. Змодельовані нормальні марківські поля нульового, першого та другого порядків, що реалізовані на поверхні двох змінних.

**Ключові слова:** випадковий процес, марківські поля, двовірний об'єкт, процес Орнштейна-Уленбека, генерування випадкових полів.

УДК 629.7

**Дослідження залежності точності вирішення термінальної задачі від вибору параметру синтезу / Н. Є. Хацько // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 52–56. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглянуто у сукупності задачу управління та задачу ідентифікації вектору стану літального апарату. Показано побудову еталонної траєкторії руху та функцій програмного управління, діючих у польоті на літальних апарат. Здійснено синтез управління у замкненому контурі алгоритмом переслідування провідної точки за інформацією інерціальної навігаційної системи, датчики якої мають сталу похибку вимірювання. Отримано вирази для розрахунку термінальної похибки місцеположення літального апарату. Знайдено кореляцію між термінальною точністю та значенням параметру синтезу. Доведено, що точність приведення вектору стану в задану термінальну точку залежить від рівня збурень і похибки вхідної інформації. Сформульовано рекомендації щодо вибору параметру синтезу при проектуванні алгоритмів автоматичного управління рухом у комплексі з проектуванням інформаційно-вимірювальної системи.

**Ключові слова:** система управління, безплатформна інерціальна навігаційна система, похибка виміру вектору стану, динамічне збурення, точність термінального управління.

УДК 330.46

**Проблемы определения зон спроса (предложения) в сильных ценовых трендах / С. В. Лубенец, Е. Н. Харций, Е. П. Павленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 57–61. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонуються методи пошуку на часових цінних графіках високо ймовірних ділянок (зон) розвороту ціни при наявності сильних ринкових тенденцій. В якості ефективного інструменту визначення таких зон запропоновано використання спеціального цінового графічного формування у вигляді корекційного пінбару. Вирішення зазначеної проблеми збільшує ймовірність успішності укладених на відкритих ринках торговельних угод, а також сприяє підвищенню прибутковості торгово-інвестиційної діяльності в цілому.

**Ключові слова:** торгово-інвестиційна діяльність, зона попиту, зона пропозиції, ціновий тренд, торгова стратегія Price action, пінбар.

УДК 519.7

**Параметрична ідентифікація моделі Солоу макроекономічної системи / О. М. Назаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 62–66. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглядається проблема ідентифікації та ідентифікації лінійної стаціонарної моделі з невідомими входами. Моделювання невідомих входів проводиться згідно принципу мультиплікатора. Траєкторії руху введених керувань розкладаються на трендову та періодичну складові, що дозволяє розв'язати диференціальні рівняння руху в явному вигляді. Параметрична ідентифікація невідомих коефіцієнтів здійснюється методами економетрики при певних обмеженнях на елементи матриць. Апробація побудованих алгоритмів проводиться на реальних статистичних даних.

**Ключові слова:** специфікація, ідентифікація, циклічний процес, імітація, прогнозування, апробація моделі.

УДК 004.921+004.8

**Розробка модуля статичної екосистеми для створення ігрових застосунків у UNITY 3D / М. І. Безменов, Ю. О. Потапенко, К. О. Дворнік // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 67–71. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Надано результати досліджень та розрахунків по розробці модуля статичної екосистеми для створення ігрових застосунків в Unity 3D. Модуль надає дизайнерові можливість вибору того, який саме об'єкт буде клонуватися, дозволяє запрограмувати правила розташування об'єктів, визначає набір параметрів, що впливають на розташування об'єктів. Реалізовано клонування на основі цих правил. Також врахована необхідність генерування об'єктів не для всього ландшафту, а тільки для обраної ділянки. Модуль має два види генерування: процедурна та нейромережева. Продемонстровано результати, отримані різними методами генерування (у тому числі з різними похибками) на прикладі розташування каменів на схилі гори. Для підтвердження який з методів генерування є найкращим, було проведено опитування серед гравців у комп'ютерній грі. Наведено результати цього опитування.

**Ключові слова:** Unity 3D, комп'ютерна графіка, тривимірна модель, оточення, нейромережа, ландшафт, ігрове оточення, генерування.

УДК 004.822

**Хмарна платформа розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень / О. В. Прохоров, В. П. Прохоров, А. О. Матюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 72–76. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонується хмарна платформа в рамках моделей PaaS і SaaS, яка забезпечує підтримку всіх етапів з розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, їх адаптацію для вирішення прикладних задач в будь-яких предметних областях, зберігання баз знань і даних в хмарних датацентрах, надання доступу до інтелектуальних системам як до сервісам віддалено через веб-інтерфейс. Розглянуто сценарії використання, розв'язувані задачі. Представлена структура платформи розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

**Ключові слова:** статистичні інтелектуальні системи, системи підтримки прийняття рішень, хмарна платформа, інтегрована середа розробки, онтології.

УДК 004.4.075

**Структурний синтез моделі зрілості SPICE Integration / Е. Ю. Рубін, М. Д. Годлевський, В. С. Бараш // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 77–81. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглядаються підходи покращення якості процесу розробки програмного забезпечення на базі моделей зрілості CMMI та SPICE. Проводиться їх порівняльний аналіз й пропонується підхід до формування гнучкої структури моделі зрілості SPICE, котрий враховує недоліки існуючих підходів. Реалізації гнучкої структури забезпечується шляхом структурного-параметричного синтезу моделі зрілості SPICE Integration.

**Ключові слова:** якість, модель зрілості, процес розробки програмного забезпечення, аналіз, структурний синтез.

УДК 658.7 (075.8)

**Структура моделі координації організаційного управління територіально розподіленими логістическими системами дистрибуції / А. С. Куценко, И. М. Годлевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 82–85. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0023.**

Наведено основні етапи формування системи організаційного управління логістикою дистрибуції. На основі конфігурування логістичної мережі формуються учасники ланцюгів поставок, які є основою для побудови організаційної структури управління. У роботі наведено структуру моделі координації для трьохрівневої системи з використанням всіх типів провайдерів. Сформовано обмеження, які пов'язують локальні задачі різних рівнів ієрархії.

**Ключові слова:** організаційне управління, логістика, дистрибуція, ланцюг постачання, координація, трьохрівнева система управління.

УДК 61:004(043)

**Розробка системи підтримки прийняття рішень для багатопрофільної медичної допомоги / О. О. Сітнікова, М. В. Почебут // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 86–91. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглянуто принципи підтримки прийняття рішень в системі сімейної медицини. Досліджено потоки даних, які використовуються для діагностики та профілактики захворювань. Запропоновано класифікацію ознак на основі аналізу даних електронної медичної картки пацієнта. Розроблено модель ідентифікації медико-біологічних параметрів на основі даних електронної медичної картки. Розроблено системну архітектуру та структуру бази даних клінічного моніторингу.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, медико-біологічні параметри, клінічний моніторинг, сімейна медицина, ідентифікація.

УДК 519.2: 658.5.011

**Формування планів виробництва електроенергії з врахуванням динаміки змін станів енергосистеми / С. В. Шевченко, А. А. Єгоянц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 91–96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.**

Пропонуються методи формування планів виробництва електроенергії з урахуванням заданої динаміки зміни стану основних виробничих ресурсів енергосистеми. На основі застосування розроблених математичних моделей і алгоритмів управління станом енергоблоків енергосистеми визначається розподіл обсягів генерації та постачання електроенергії, а також графіки роботи окремих енергоблоків, які забезпечують задані обсяги споживання. Результати роботи можуть бути використані у складі задач системи диспетчерського управління енергосистемою.

**Ключові слова:** електроенергія, енергосистема, зміна станів, критерій, модель, оптимізація, алгоритм, аналіз.

УДК 519.681

**Транспортная задача линейного программирования с нечетким спросом / В. В. Карпенко, Р. Х. Ахмадов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 97–101. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Розглянуто модель транспортної задачі лінійного програмування. Особливістю моделі є те, що попит на продукт у пунктах його реалізації визначений нечітко. Запропоновано метод розв'язання цієї задачі. Цей метод використовує комплексний критерій, що враховує можливі втрати, які пов'язані з невизначеністю попиту, а також витрати на перевезення продукту. Метод реалізує ітераційну процедуру послідовного покращення плану. Також запропонований альтернативний метод розв'язання транспортної задачі. Він складається з двох

кроків. На першому кроці виконується перетворення початкової задачі з двома індексами до задачі з одним індексом. На другому кроці розв'язується отримана задача, при цьому враховується що компонентами комплексного критерію є нечіткі числа.

**Ключові слова:** транспортна задача, лінійне програмування, нечіткий попит, оптимізація перевезень, нечітка математика, планування транспортувань, мінімізація втрат від невизначеності.

УДК 658.506

**Об одном подходе к решению задачи оптимизации структуры бизнес-процессов предприятия / А. М. Копп, Д. Л. Орловский //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 102–108. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Розглядається задача підтримки процесу дослідження та аналізу бізнес-структури підприємства, розглядаються задачі моделювання, аналізу та оптимізації бізнес-процесів, їх місце та роль в управлінні підприємством. Також були розглянуті проблеми моделювання бізнес-процесів, місце та роль моделювання бізнес-процесів в задачі аналізу діяльності підприємства, питання, пов'язані з оптимізацією бізнес-процесів та основні підходи до її проведення. Для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати засоби імітаційного моделювання, різні математичні моделі та методи. Для інформаційної підтримки вирішення поставленої задачі розроблена база даних та додаток, що реалізує відповідне математичне та алгоритмічне забезпечення вирішення поставленої задачі.

**Ключові слова:** підприємство, бізнес-структура, бізнес-процеси, моделювання бізнес-процесів, аналіз бізнес-процесів, оптимізація бізнес-процесів.

УДК 004.942:656.073

**Управління логістикою в різномірних транспортних мережах / О. Є. Федорович, Н. В. Єременко //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 109–115. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.

Вирішено завдання побудови методів і моделі інформаційної технології логістичного управління вантажопотоками в різномірних транспортних мережах при формуванні складних каналів доставки вантажів. Запропоновано метод розрахунку основних показників вантажоперевезень. Описано модель управління вантажоперевезеннями з використанням фракталів і агентного моделювання. Запропоновано послідовність формування фрактальної моделі управління. Побудовано архітектуру прикладної інформаційної технології логістичного управління вантажоперевезеннями.

**Ключові слова:** різномірна транспортна мережа, мультимодальні вантажоперевезення, пункт перевалки, складування, управління збутом, фрактали, агенти, інформаційна технологія.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 004.9

**Динамическая модель планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения / М. Д. Годлевский, Э. Е. Рубин, А. А. Голоскокова //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 3–6. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Предлагается модель среднесрочного планирования (динамическая постановка задачи) улучшения качества процесса разработки программного обеспечения на основе технологии СММИ (capability maturity model integration), представляющей собой модель зрелости. Используются функции полезности двух групп критериев: степени достижения целевого профиля и ресурсного обеспечения (финансовая и временная составляющие). Решение данной задачи определяет целевой профиль, который в дальнейшем составит основу статической постановки задачи.

**Ключевые слова:** качество, модель зрелости, функция полезности, целевой профиль, динамическая модель.

УДК 681.518:658.512

**Методы и инструментальные средства для управления динамическим каталогом требований в гибких процессах разработки программного обеспечения / Н. В. Ткачук, Р. А. Гамзаев, И. О. Мартинкус, С. Д. Янушкевич //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 7–13. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Предлагается подход управления динамическим каталогом требований при гибком методе разработки программного обеспечения. В качестве примера рассмотрено Scrum методологию гибкой разработки программного обеспечения. Рассмотрены методы решения данной проблемы. Для реализации метода используется комбинация латентно-семантического анализа и метода анализа иерархий для решения проблемы дубликации данных, и возможных логических конфликтов. Кроме этого предложенное решение поддерживает процедуру принятия решений для приоритизации требований зависимости от назначения программного продукта. Эффективность предложенного метода проверена тестовым примером.

**Ключевые слова:** гибкие методологии, латентно-семантический анализ, динамический каталог требований, метод анализа иерархий.

УДК 004.822

**Логико-лингвистическая модель идентификации семантически эквивалентных коллокаций / С. В. Петрасова, Н. Ф. Хайрова //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 14–17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Предлагается логико-лингвистическая модель идентификации семантически близких коллокаций. Для автоматического определения семантической корреляции эквивалентности между коллокатами использован метод компонентного анализа. В предлагаемой модели для формализации семантически близких коллокаций определено множество семантико-грамматических характеристик коллокатов, отношения между которыми описаны с использованием базового аппарата алгебры предикатов. Сделаны выводы о необходимости учета как синтаксической, так и семантической информации о лексических единицах, что позволит повысить эффективность семантической обработки текстов.

**Ключевые слова:** семантически близкие коллокации, корреляция эквивалентности, коллокаты, метод компонентного анализа, семантико-грамматические характеристики, аппарат алгебры предикатов.

УДК 519.235

**Показатели степени связи между номинальными признаками / О. Н. Безменова, И. П. Гамаюн, Н. И. Безменов //** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 18–24. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Рассматривается проблема оценивания степени связи между параметрами, измеряемыми в шкале наименований. Предложены показатели степени связи, основанные на максимизации вероятности правильного предсказания значения одного параметра по значению

другого. Построены показатели, ориентированные на линейную зависимость от вероятностей отдельных значений, а также показатели с эллиптической зависимостью. На основе предложенных показателей сформированы коэффициенты связи. Получены оценки предложенных показателей степени связи, базирующиеся на принципе максимального правдоподобия. Сделаны выводы о возможности использования предложенных показателей степени связи при решении задач группировки параметров и классификации объектов.

**Ключевые слова:** степень связи, параметр, шкала наименований, показатель степени связи, коэффициент связи, линейная зависимость, эллиптическая зависимость, принцип максимального правдоподобия.

УДК 681.5

**Структурный и параметрический синтез системы стабилизации квазистатистического технологического процесса / А. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (948). – С. 25–28. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Предлагается один из возможных подходов к синтезу регулятора состояния технологического процесса, математическая модель которого представлена в виде системы трансцендентных уравнений, связывающих входы и выходы технологического процесса. Целью работы является адаптация методов современной теории управления к управлению квазистатистическими процессами. Подробно рассмотрен линейный случай взаимосвязи «вход-выход» и квадратичный критерий качества процесса стабилизации состояния технологического процесса.

**Ключевые слова:** технологический процесс, система стабилизации, линейно-квадратичная задача, квазистатистическая математическая модель, теория управления.

УДК 629.423.3

**Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии / В. П. Северин, Л. В. Оверьянова, О. В. Омеляненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 29–32. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматривается пригородный электропоезд с асинхронными тяговыми двигателями и бортовыми накопителями энергии. Предложена система управления перетоком мощности в исследуемом тяговом приводе с накопителем при питании от контактной сети. Показана стратегия системы управления, заключающаяся в обеспечении компенсации излишков или нехватки мощности тягового инвертора за счет управления током накопителя. Предложенная система управления потоком мощности позволит рекуперировать энергию в накопитель до полной остановки электроподвижного состава.

**Ключевые слова:** пригородный электропоезд, асинхронный электродвигатель, электромеханический инерционный накопитель энергии, тяговый инвертор, DC-DC преобразователь, система управления.

УДК 621.384.6

**Использование спадающего магнитного поля соленоида для управления параметрами электронного пучка, формируемого магнетронной пушкой / А. С. Мазманишвили, Н. Г. Решетняк, А. Ю. Сидоренко, И. А. Чертищев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 33–37. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Представлены результаты исследований и расчетов по формированию и управлению радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов  $35...65 \text{ кэВ}$ , и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля управляющего магнита. Приведены результаты численного моделирования движения трубчатого электронного потока. Показано, что при выбранных начальных условиях для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки, поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого около сантиметра. Показана возможность регулирования места попадания пучка на вертикальную стенку при вариации амплитуды управляющего магнитного поля.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, магнитное поле, численное моделирование электронного потока, управление радиального электронного пучка.

УДК 621.3.078.001

**Параметрический синтез цифровой системы наведения танковой зенитной установки / Т. Е. Александрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 37–40. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматривается задача отыскания значений варьируемых параметров системы наведения танковой зенитной установки закрытого типа, в которой зенитный пулемет установлен на вращающейся командирской башенке, а наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования. Показано, что качество работы системы наведения оценивается точностью поддержания заданной угловой скорости наведения, быстродействием и энергетическими затратами на наведение.

**Ключевые слова:** танковая зенитная установка, импульсная система регулирования, точность, быстродействие, энергетические затраты на наведение.

УДК 004.3'12:621.396.6-027.31:004.3'124

**Влияние конструкции радиоэлектронной аппаратуры на начало регулярного теплового режима / В. И. Азаренков, И. М. Майко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 41–47. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0023.**

Приведены расчетные зависимости решения уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода. Дана оценка результатов расчетов по полученным графическим данным путем сравнения их с результатами расчетов по аналитическим зависимостям и с экспериментальными данными о влиянии конструкции радиоэлектронной аппаратуры на начало регулярного теплового режима. Показано, что результаты исследования могут быть распространены на решение уравнения теплопроводности анизотропного тела с внутренними источниками энергии.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловая модель, тепловое поле, температурное поле, радиоэлектронная аппаратура, тепловой режим, регулярный тепловой режим.

УДК 519.2+539.1

**Алгоритм повышения порядка стационарного стохастического марковского поля на плоскости / А. С. Мазманишвили, А. Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 48–51. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Алгоритм генерирования случайного двумерного объекта на плоскости используется при моделировании движения транспортных средств и при рассмотрении других задач, при решении которых требуется применить марковские случайные поля второго порядка. Синтезирован алгоритм построения двумерного вещественного нормального марковского поля второго порядка, любые ортогональные



сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна-Уленбека. Показано, что предлагаемый подход позволяет синтезировать марковские случайные поля более высокого порядка. Смоделированы нормальные марковские поля нулевого, первого и второго порядков, реализованные на плоской поверхности двух переменных.

**Ключевые слова:** случайный процесс, марковские поля, двумерный объект, процесс Орнштейна-Уленбека, генерирование случайных полей.

УДК 629.7

**Исследование зависимости решения терминальной задачи управления от выбора параметра синтеза / Н. Е. Хацько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 52–56. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматривается функционирование системы управления и системы идентификации вектора состояния летательного аппарата в одном замкнутом контуре. Показано построение эталонной траектории движения и функций программного управления методом решения обратных задач динамики с использованием значений аэродинамических сил, действующих на летальный аппарат. Проведен в аналитическом виде синтез управляющих функций в замкнутом контуре методом преследования ведущей точки по информации инерциальной навигационной системы с датчиками известной точности. Найдена взаимосвязь между терминальной точностью и значением параметра синтеза (глубиной прогноза). Получены выражения для вычисления ошибки местоопределения, содержащие обобщенную ошибку акселерометров, величину внешнего возмущения и значение глубины прогноза. Показано, что точность приведения вектора состояния в терминальную точку зависит от значения параметра синтеза. Сформулированы рекомендации по выбору параметра синтеза, которые могут быть полезны при проектировании алгоритмов автоматического управления движением в комплексе с проектированием информационно-измерительной системы.

**Ключевые слова:** система управления, бесплатформенная инерциальная навигационная система, ошибка измерения вектора состояния, динамическое возмущение, точность терминального управления.

УДК 330.46

**Проблемы определения зон спроса (предложения) в сильных ценовых трендах / С. В. Лубенец, Е. Н. Харций, Е. П. Павленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 57–61. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.**

Предлагаются методы поиска на временных ценовых графиках высоко вероятных участков (зон) разворота цены при наличии сильных рыночных тенденций. В качестве эффективного инструмента определения таких зон предложено использование специального ценового графического формирования в виде коррекционного пинбара. Решение указанной проблемы увеличивает вероятность успешности заключенных на открытых рынках торговых сделок, а также способствует повышению прибыльности торгово-инвестиционной деятельности в целом.

**Ключевые слова:** торгово-инвестиционная деятельность, зона спроса, зона предложения, ценовой тренд, торговая стратегия Price action, пинбар.

УДК 519.7

**Параметрическая идентификация модели Солоу макроэкономической системы / А. М. Назаренко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 62–66. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматривается проблема спецификации и идентификации линейной стационарной модели с неизвестными входами. Моделирование неизвестных входов проводится согласно принципу мультипликатора. Траектории движения введенных управлений раскладываются на трендовую и периодическую составляющие, что позволяет решить дифференциальные уравнения движения в явном виде. Параметрическая идентификация неизвестных коэффициентов осуществляется методами эконометрики при определенных ограничениях на элементы матриц. Апробация построенных алгоритмов проводится на реальных статистических данных.

**Ключевые слова:** спецификация, идентификация, циклический процесс, имитация, прогнозирование, апробация модели.

УДК 004.921+004.8

**Разработка модуля статической экосистемы для создания игровых приложений в UNITY 3D / Н. И. Безменов, Ю. А. Потапенко, К. А. Дворник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 67–71. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Представлены результаты исследований и расчетов по разработке модуля статической экосистемы для создания игровых приложений в Unity 3D. Модуль предоставляет дизайнеру возможность выбора того, какой именно объект будет клонироваться, позволяет запрограммировать правила размещения объектов, определяет набор параметров, влияющих на расположение объектов. Реализовано клонирование на основе этих правил. Также учтена необходимость генерирования объектов не для всего ландшафта, а только для выбранного участка. Модуль имеет два вида генерирования: процедурная и нейросетевая. Продемонстрированы результаты, полученные разными методами генерирования (в том числе с различными погрешностями) на примере расположения камней на склоне горы. Для подтверждения того, какой из методов генерирования является наилучшим, был проведен опрос среди геймеров. Приведены результаты этого опроса.

**Ключевые слова:** Unity 3D, игровое окружение, компьютерная графика, трехмерная модель, окружение, нейронная сеть, ландшафт, генерирование.

УДК 004.822

**Облачная платформа разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений / А. В. Прохоров, В. П. Прохоров, А. О. Матюшко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 72–76. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Предлагается облачная платформа в рамках моделей PaaS и SaaS, которая обеспечивает поддержку всех этапов по разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений, их адаптацию для решения прикладных задач в любых предметных областях, хранение баз знаний и данных в облачных датацентрах, предоставление доступа к интеллектуальным системам как к сервисам удаленно через веб-интерфейс. Рассмотрены сценарии использования, решаемые задачи. Представлена структура платформы разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы, системы поддержки принятия решений, облачная платформа, интегрированная среда разработки, онтологии.

УДК 004.4.075

**Структурный синтез модели зрелости SPICE Integration / Э. Е. Рубин, М. Д. Годлевский, В. С. Бараш // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 58 (1167). – С. 77–81. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматриваются подходы к улучшению качества процесса разработки программного обеспечения на основе моделей зрелости CMMI и SPICE. Проводится их сравнительный анализ и предлагается подход к формированию гибкой структуры модели зрелости SPICE, которая учитывает недостатки существующих моделей. Реализация гибкой структуры осуществляется путём структурно-параметрического синтеза модели зрелости SPICE Integration.

**Ключевые слова:** качество, модель зрелости, процесс разработки программного обеспечения, анализ, структурный синтез.

УДК 658.7 (075.8)

**Структура модели координации организационного управления территориально распределенными логистическими системами дистрибуции / А. С. Куценко, И. М. Годлевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 82–85. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0023.**

Приведены основные этапы формирования системы организационного управления логистикой дистрибуции. На основе конфигурирования логистической сети формируются участники цепочек поставок, которые являются основой для построения организационной структуры управления. В работе приведена структура модели координации для трехуровневой системы с использованием всех типов провайдеров. Сформированы ограничения, которые связывают локальные задачи различных уровней иерархии.

**Ключевые слова:** организационное управление, логистика, дистрибуция, цепочка поставок, координация, трехуровневая система управления.

УДК 61:004(043)

**Разработка системы поддержки принятия решений для многопрофильной медицинской помощи / О. А. Ситникова, М. В. Почебут // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 86–91. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассмотрены принципы поддержки принятия решений в системе семейной медицины. Исследованы потоки данных, которые используются для диагностики и профилактики заболеваний. Предложена классификация признаков на основе анализа данных электронной медицинской карты пациента. Разработана модель идентификации медико-биологических параметров на основе данных электронной медицинской карты. Разработана системная архитектура и структура базы данных клинического мониторинга.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, медико-биологические параметры, клинический мониторинг, семейная медицина, идентификация.

УДК 519.2: 658.5.011

**Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы / С. В. Шевченко, А. А. Егоянц // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 91–96. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0023.**

Предлагаются методы формирования планов производства электроэнергии с учетом заданной динамики изменения состояния основных производственных ресурсов энергосистемы. На основе применения разработанных математических моделей и алгоритмов управления состоянием энергоблоков энергосистемы определяется распределение объемов генерации и поставки электроэнергии, а также графики работы отдельных энергоблоков, обеспечивающих заданные объемы потребления. Результаты работы могут быть использованы в составе задач системы диспетчерского управления энергосистемой.

**Ключевые слова:** электроэнергия, энергосистема, изменение состояний, критерий, модель, оптимизация, алгоритм, анализ.

УДК 519.681

**Транспортная задача линейного программирования с нечетким спросом / В. В. Карпенко, Р. Х. Ахмадов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 97–101. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассмотрена модель транспортной задачи линейного программирования, в которой спрос на транспортируемый продукт в пунктах его реализации задан нечетко. Предложен метод решения этой задачи. Он основывается на комплексном критерии, который учитывает потери, возникающие в связи с неопределенностью спроса, а также транспортные расходы. Метод реализует итерационную процедуру последовательного улучшения плана. Также предложен альтернативный двухшаговый метод решения транспортной задачи, преобразующий первоначальную двухиндексную задачу к одноиндексной. Полученная одноиндексная задача решается с учетом того, что компоненты составного критерия являются нечеткими числами.

**Ключевые слова:** транспортная задача, линейное программирование, нечеткий спрос.

УДК 658.506

**Об одном подходе к решению задачи оптимизации структуры бизнес-процессов предприятия / А. М. Копп, Д. Л. Орловский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 102–108. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.**

Рассматривается задача поддержки процесса исследования и анализа бизнес-структуры предприятия, рассматриваются задачи моделирования, анализа и оптимизации бизнес-процессов, их место и роль в управлении предприятием. Также были рассмотрены проблемы моделирования бизнес-процессов, место и роль моделирования бизнес-процессов в задаче анализа деятельности предприятия, вопросы, связанные с оптимизацией бизнес-процессов и основные подходы к ее проведению. Для решения поставленной задачи предлагается использовать средства имитационного моделирования, различные математические модели и методы. Для информационной поддержки решения поставленной задачи разработана база данных и приложение, реализующее соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение решения поставленной задачи.

**Ключевые слова:** транспортная задача, линейное программирование, нечеткий спрос, оптимизация перевозок, нечеткая математика, планирование транспортных, минимизация потерь от неопределенности.

УДК 004.942:656.073

**Управление логистикой в разнородных транспортных сетях / О. Е. Федорович, Н. В. Еременко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 109–115. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0023.**

Решена задача построения методов и модели информационной технологии логистического управления грузопотоками в разнородных транспортных сетях при формировании сложных каналов доставки грузов. Предложен метод расчета основных показателей грузоперевозок. Описана модель управления грузоперевозками с использованием фракталов и агентного моделирования. Предложена последовательность формирования фрактальной модели управления. Построена архитектура прикладной информационной технологии логистического управления грузоперевозками.

**Ключевые слова:** разнородная транспортная сеть, мультимодальная грузоперевозка, пункт перевалки, складирование, управление сбытом, фракталы, агенты, информационная технология.

ABSTRACTS

UDC 004.9

**Dynamic planning model of quality improvement of software development process/ M. D. Godlevsky, E. U. Rubin, A. A. Goloskokova //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 3–6. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

The task of quality improvement planning of the software development process is presented in the form of the problem of rolling scheduling, which involves the formation of static and dynamic models. There have been proposed the dynamic problem statement, which is based on the formalization of maturity model. The utility functions of the extent of achieving the target profile and resource provision, necessary to accomplish the goal were used as criteria. Resource provision is determined by two generalized indicators. The first is finance, which are distributed among the individual structural components (practice and focus areas) of the software development process. The second - a resource indicator, is associated with the time the company employees must spend on advancing the software development process to a higher maturity level, that is, the time the employees are distracted from the company's core activities. The solution of the dynamic problem allows to determine the target profile for the static problem statement.

**Keywords:** quality, maturity model, utility function, goal-oriented profile, dynamic model.

UDC 681.518:658.512

**Methods and tools for dynamic requirements catalog management in agile software development / M. V. Tkachuk, R. A. Gamzaev, I. O. Martinkus, S. D. Ianushkevych //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 7–13. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

A method for managing dynamic requirements catalog in agile software development, especially on example of Scrum-methodology is proposed. Popular approaches to solving this problem are reviewed. The proposed approach is based on the combined usage of the latent semantic analysis and analytical hierarchy process, it allows to evaluate the given textual software specification with respect to their possible redundancy and possible logical conflicts. Besides that this approach supports the decision making procedure to prioritize the requirements taking into account their functionality importance for target software product. The effectiveness of the proposed method was tested on the test case.

**Keywords:** Agile, latent semantic analysis, dynamic catalog of requirements analytic hierarchy process.

UDC 004.822

**A logical and linguistic model for identification of collocation similarity / S. V. Petrasova, N. F. Khairova //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 14–17. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

A logical and linguistic model for identification of collocation similarity has been proposed. The method of component analysis is proposed to determine the binary semantic correlation of equivalence between collocates. The model formalizes semantic equivalence of collocations by means of semantic and grammatical characteristics of the main and dependent collocates in substantive, adjective and verb collocations. The set of semantic and grammatical characteristics of collocates is identified by means of algebra of predicates. This logical and linguistic model is designed to increase the efficiency of semantic text processing by taking into account both syntactic and semantic information of lexical units.

**Keywords:** collocation similarity, component analysis, semantic equivalence, collocate, semantic and grammatical characteristics, algebra of predicates, semantic text processing.

UDC 519.235

**Relation showing between the nominal signs / O. M. Bezmenova, I. P. Gamayun, M. I. Bezmenov //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 18–24. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

The problem of estimating the degree of relationship between the parameters measured in the nominal scale is being examined. Indexes of relationship which are based on maximization of correct prediction probability of parameter value by value of another parameter is proposed. Indexes with elliptical dependence and indexes oriented on linear dependence on the probabilities of the individual values are created. Coupling coefficients which are based on the proposed indexes are formed. Estimation of suggested indexes of relationship based on the principle of maximum likelihood is received. The conclusions about the possibility of using the proposed indexes for solution of parameter grouping and object classification problems are made.

**Keywords:** degree of relationship, parameter, naming scale, index of relationship, coupling coefficient, linear relationship, elliptical dependence, principle of maximum likelihood.

UDC 681.5

**Structural and parametric synthesis of the stabilization system of the quasi-static technological process / A. S. Kutsenko, S. V. Kovalenko, V. I. Tovagnyansky //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 42 (948). – P. 25–28. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

One of the possible approaches to the synthesis of regulator of the state of the technological process, which mathematical model is presented in the form of transcendental equations linking the inputs and outputs of the technological process is offered in the article. The objective of the research is the adaptation the methods of modern control theory to the quasi-static processes, given by the static mathematical models. The case of a linear relationship "input-output" and quadratic criterion of the quality of the process of state stabilization of the technological process is examined in detail. The advantages and disadvantages of quasi-static mathematical models of controlled processes are analyzed.

**Keywords:** technological process, stability, linear-quadratic problem, quasi-static mathematical model, control theory.

UDC 629.423.3

**Power flow control in electric traction drive powered by the contact network and inertial energy storage devices / V. P. Severin, L. V. Overyanova, O. V. Omelyanenko //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 29–32. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-0023.

A commuter train with asynchronous traction engines and on-board energy storage devices is considered. Electromechanical flywheel storage with inverted DC machine and a solid-state switch was used as an energy storage unit. A scheme of a train traction aggregator was proposed. This scheme includes main parts, such as rotary-field motor and storage device, and solid-state devices - traction inverter and DC-DC chopper. Work of the scheme powered without trolley system was considered. Mathematical models of the energy exchange between traction engine and storage device were created. The results of numerical modeling which allow to estimate the energy efficiency of the system were received. Power flow-over controlling system in the traction mechanism (with storage device) powered by the trolley line was proposed for energy efficiency indexes increase. Controlling system strategy that is in providing compensation for excess or shortage of power of traction inverter by energy storage current management was demonstrated. Controlling system of the power flow that was proposed allows to restore energy into storage device until the full stop of the train.

**Keywords:** commuter train, asynchronous motors, inertial energy storage, traction inverter, DC-DC converter, control system.

UDC 621.384.6

**Using the decreasing magnetic field of the solenoid to control parameters of the electron beam formed by magnetron gun / O. S. Mazmanishvili, M. G. Reshetnyak, G. Y. Sydorenko, I. O. Chertyshev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 33–37. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.**

The results of researches and simulations on the formation and management of the radial electron beam magnetron gun with secondary-emission cathode in the electron energy range 35...65 keV and measure its parameters during transport in the total falling magnetic field of the solenoid and the control field of the magnet are presented. The results of numerical simulations, the movement of the tubular electron beam are given. It is shown that for the chosen initial conditions for the electron beam and the distribution of the longitudinal magnetic field along the axis of the gun and the transport channel is the electron current reaches the vertical section with a length of the order of a centimeter. The possibility of adjusting the beam hit the place on a vertical wall with the variation of the amplitude of the control of the magnetic field is shown. The present paper describes the experimental and theoretical data on radial electron beam formation by a magnetron gun with a secondary-emission cathode. The initial conditions for the particle flux, which meet the experimental conditions, as well as the conditions of radial current registration, have been formulated. The numerical simulation data are presented on the tubular electron flux motion. The simulation data are in satisfactory agreement with the experimental results.

**Keywords:** electronic bunch, magnetron gun, magnetic field, numeral design of electronic stream, management of radial electronic bunch.

UDC 621.3.078.001

**Parametric synthesis of digital systems targeting tank anti-aircraft gun / T. Ye. Aleksandrova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 37–40. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-0023.**

The problem of finding the values of the variable parameters of the systems targeting tank anti-aircraft gun of the closed type, in which the anti-aircraft machine gun is mounted on a rotating commander's cupola, and pointing guns at air and ground targets is carried out from the commander's turret with the remote guidance associated with the electric pulse regulation. It is shown that the quality of the estimated accuracy of the systems targeting maintain the desired angular velocity of guidance, speed and power consumption for targeting. As variable parameters systems targeting tank anti-aircraft gun selected gear ratio, the repetition period of the control pulses and the parameters determining the value of the duty cycle of the control pulse. It is shown that the gear ratio should be selected on the basis of a compromise between precision targeting tank anti-aircraft gun, performance and power consumption for targeting. The values of the variable parameters, which provide high dynamic properties of closed systems targeting tank anti-aircraft gun high pointing accuracy and low power consumption for targeting are defined.

**Keywords:** tank anti-aircraft gun, impulse control system, precision, speed, power consumption for targeting.

UDC 004.3'12:621.396.6-027.31:004.3'124

**Influence design of electronic equipment at the beginning of regular thermal regime / V. I. Azarenkov, I. M. Majko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 41–47. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-0023.**

The paper presents results of development of methods of calculation temperature fields of planned and existing products, based on the analytical solution of the heat equation for basic shapes. The proposed General expression of the solution of the heat conduction equation for anisotropic solids with volume, plane, line or point heat sources. The method estimates the beginning of regular thermal regime in a body of arbitrary configuration with an internal energy source with a uniform initial temperature distribution. The calculated dependence of the solution of the heat conduction equation with boundary conditions of III kind. Evaluation of the results of calculations on the received image data by comparing them with the results of calculations by analytical dependences with the experimental data on the influence of design of electronic equipment at the beginning of regular thermal regime. It is shown that the results of the study can be extended to the solution of the heat conduction equation for an anisotropic body with internal energy sources.

**Keywords:** mathematical model, thermal model, thermal field, temperature field, electronics, thermal mode, regular thermal mode.

UDC 519.2+539.1

**Algorithm of increasing of order of stationary stochastic Markov field on the flat surface / O. S. Mazmanishvili, G. Y. Sydorenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 48–51. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.**

The algorithm for generating random two-dimensional object on the plane is 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. Similar statements can be formulated for the fields, which are generated in the amount and in the space of a higher dimension. The reduction in the value of the partial decrements observed smoothing of the generated form field. It is noted that partial decrements additions affect the kind of topography of the generated field.

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

UDC 629.7

**Research of dependence of decision the terminal control problem with the use of information of inertial module / N. E. Khatsko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 52–56. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.**

The article considers functioning of control system and system identification of the state vector in closed circuit. It describes building of trajectory of etalon motion and a set of functions of programmatic control by using the solution method for inverse problems of dynamics. This method also takes into account values of aerodynamic forces that influence an aircraft during its motion. Control functions were analytically synthesized in a closed circuit applying method of leading point pursuit using the information from inertial navigation system containing sensors of known precision. It was found a correlation between terminal precision and specific values of the synthesis parameter (the depth prognosis). The obtained mathematical expressions for calculating positioning error contain: value of generalized accelerometer error, external perturbation value, and value of depth prognosis. It is demonstrated that precision of the state vector in the terminal point depends on the synthesis parameter value. The recommendations on choosing parameter of synthesis were given. They can be useful for design of movement control algorithms in pair with design of information-measuring system.

**Keywords:** control system, strapdown inertial navigation system, the measurement the error of the state vector measurement, dynamical disturbance, the accuracy of the terminal management.

UDC 330.46

**Problem areas determination of demand (supply) in a strong price trend / S. V. Lubenec, E. N. Harcij, E. P. Pavlenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 57–61. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

The methods of the search are proposed the temporary price charts high probability areas (zones) price reversal in the presence of strong market trends, where there is a significant imbalance between supply and demand on the market. As an effective tool for defining such areas is proposed to use a special price in the form of a graphic form correction pinbar that unmasks the working timeframe the price chart hidden areas such as Rally–Base–Rally or Drop–Base–Drop. Further more precise definition of these zones is performed on smaller timeframes. Successful preliminary search of topping bands, as well as the conclusion of the open markets of commercial transactions in achieving their cost, increases the likelihood of success of commercial transactions. The solution of this problem contributes to the profitability of the trade and investment activities in general. Ways of further study examined issues.

**Keywords:** trade and investment, the demand zone, the zone supply, price trend, trading strategies Price action, pinbar.

UDC 519.7

**Parametric identification Solow model of macroeconomic system / O. M. Nazarenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 62–66. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-0023.

The problem specification and identification of linear stationary model with unknown inputs. Modeling the unknown inputs carried out according to the principle of the multiplier. The trajectories of the input controls are arranged on the trend and periodic components that can solve differential equations of motion explicitly. Injected controller which includes two control devices that generate the necessary additional constraints on the parameters of the system of differential equations. Parametric identification of unknown coefficients of the model is carried out by methods of econometrics, under certain restrictions on the elements of the matrices. Testing of these algorithms is carried out on the real statistics of macroeconomic dynamics.

**Keywords:** specification, identification, cyclical process, simulation, prediction, approbation model.

UDC 004.921+004.8

**A Unity 3D engine plugin for creating static ecosystem in game environments / M. I. Bezmenov, Y. O. Potapenko, K. O. Dvornik** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 67–71. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Here we report on the researches and development of the static ecosystem plugin to Unity 3D game development platform, also the creation of neural network has been described. It allows for the designer-driven automatic generation of computer game assets based on the two vastly different approaches: procedural and artificial-neural-network-based; with user-defined object to be cloned, area to be populated and placement rules. Both methods have been applied to the problem of photorealistic distribution of stones on the hillside (including demonstration of the common placements mistakes). All the approaches were then evaluated by the panel of the computer gamers. Opinion of some participants of the experiment with the corresponding results were summarized.

**Keywords:** Unity 3D, game environment, artificial neural networks, procedural generation, computer graphics, 3D modeling, landscape.

UDC 004.822

**Cloud development platform of intelligent decision support systems / A. V. Prokhorov, V. P. Prokhorov, A. O. Matiushko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 72–76. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Proposed cloud platform within the PaaS model and SaaS, which provides support for all phases of the development of intelligent decision support systems, adapting them for applications in all subject areas, storage of knowledge bases and data in cloud data centers, providing access to intelligent systems as services remotely via the web interface. Considered scenarios, tasks. The structure of the development platform of intelligent decision support systems is provided. The platform provides relief to development, testing, deployment and maintenance of intelligent systems without investment in infrastructure and software environment; increasing the degree of intellectualization and adapting existing information systems to changes in goals and objectives.

**Keywords:** intelligent systems, decision support systems, cloud platform, integrated development environment, ontology.

UDC 004.4.075

**Structural synthesis of the maturity model SPICE Integration / E. E. Rubin, M. D. Godlevskiy, V. S. Barash** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 77–81. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

Nowadays lots of IT companies face the plethora of problem on their way to the successful ending of their projects. Even if they have enough time, money and resources (e.g. people, technical equipment, etc.), it is quite challenging for them to deliver their project on time, within budget and with appropriate level of quality. Hence, there have been created several approaches in order to improve quality of processes that are involved into software development. The most popular branch of them is software process improvement (SPI). The main representative of SPI is maturity models such as CMMI and SPICE (ISO/IEC TR 15504).

There has been provided a comparison of them and come up a means of composing a flexible structure of the maturity model SPICE that takes into account drawbacks of existing models. For instance, CMMI does not provide companies with freedom in decision-making – it says to companies what they have to achieve and complete despite their goals, uniqueness of their spheres of expertise and so on. Talking about SPICE, it does not provide companies with road maps to accomplish the best quality of their work that they need to.

Therefore, there have been described approaches of improving quality of software development process that are based on the maturity models and proposed a procedure of structural synthesis of the maturity model SPICE Integration.

**Keywords:** quality, maturity model, software development process, analysis, structural synthesis.

UDC 658.7 (075.8)

**The structure of the coordination of organizational management model geographically dispersed distribution logistics systems / O. S. Kutsenko, I. M. Godlevskiy** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 82–85. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0023.

The problem relevance of organizational management of allocated distribution logistics system is shown. The main stages of this task are represented. The main stages are: the logistics network configuration; the formation of members of the supply chain network; the synthesis of variants of hierarchical organizational structure; the optimization of allocated logistics system on the basis of inter-organizational and cross-functional coordination. The basic participants of supply chain implementation are emphasized. They are OEM (Original Equipment Manufactures), 3PL provider (Third Party Logistics Provider), 4PL provider (Fourth Party Logistics Provider), LLP Provider (Lead Logistics Provider), as well as functional units of OEM and LLP. The organizational structure of the three-tier system of supply chain management is considered with concerning the all types of providers. The main tasks solved at every management level are underlined. The control variables used at the related hierarchical levels are suggested.

**Keywords:** organizational management, logistics, distribution, supply chain, coordination, management three-tier system.

UDC 61:004(043)

**Development of decision support system for multi-field medical care / O. O. Sitnikova, M. V. Pochebut //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 86–91. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0023.

The given paper considers the basic principles of decision-making support in the system of family medicine. The sources of data for clinical monitoring are described, which include health encounter, health screening, and medical records. The flows of data used for diagnostics and diseases prevention are analyzed in the paper. The main attention is paid to data of medical records such as demographic data, results of examinations, information about diseases and the lists of medical disposals. The classification of features based on the analysis of patient's electronic medical records is suggested. The logical data model for decision support system is represented. It is suggested to formalize knowledge that form the basis of decision-making process of family physician with the help of the theory of intelligence, in particular, via the method of comparator identification. The architecture of the information system of clinical monitoring is developed.

**Keywords:** decision support system, medical-biological parameters, clinical monitoring, family medicine, identification.

UDC 519.2: 658.5.011

**Formation of the plans for the production of electricity, taking into account the dynamics of changes in the state power system / S. V. Shevchenko, A. A. Egoyanc //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 91–96. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0023.

In the paper a method of forming plans for the production of electricity, taking into account the dynamics of changes the state of the basic production resources power system. On the basis of the developed mathematical models and algorithms to control the state of the power system are determined of the distribution of units of volume of the generation and supply of electricity, as well work schedules of separate units, ensuring the production of electricity in accordance with the required volume of consumption. The results can be used as part of the tasks of the functional structure of subsystem supervisory control of power system.

**Keywords:** electricity grid, changing conditions, criteria, model, optimization, algorithm, analysis.

UDC 519.681

**Using the statistical analysis methods in the processing of survey data of population / V. V. Karpenko, R. H. Akhmadov //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 97–101. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

A model of the transportation problem of linear programming, in which the demand for the product transported in points of its implementation clearly defined. A method for solving this problem. It is based on complex criteria that take into account the losses arising from the uncertainty of demand, the losses associated with lost profit in the deficit of the goods and transport costs for the carriage of goods. The method implements an iterative procedure consistent improvement plan. Also proposed an alternative two-step method for solving the transport problem, which converts the two-index the original problem to the problem of single index. The resulting vector single index consists of components that are fuzzy numbers. As a solution to the problem adopted a set of numbers that minimizes the possible losses from these factors.

**Keywords:** transportation problem, linear programming, fuzzy demand, traffic optimization, fuzzy math, transportation planning, minimization of losses from the uncertainty.

UDC 658.506

**About the one approach to solving the problem of enterprise business process structure optimization / A. M. Kopp, D. L. Orlovskiy //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 102–108. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0023.

The article considers the problem of support of the process of research and analysis of the enterprise business structure, considers the problems of modeling, analysis and optimization of business processes, their place and role in enterprise management. Also there were considered problems of business process modeling, place and role of the business process modeling in the problem of the enterprise analysis, issues related to business process optimization and the main approaches to it performing. To solve the considered problem there were proposed to use simulation tools, different mathematic models and methods. To provide the information support of the considered problem there were developed the database and application that implements specific mathematic and algorithmic support of the considered problem solution.

**Keywords:** enterprise, business structure, business processes, business process modeling, business process analysis, business process optimization.

UDC 004.942:656.073

**Logistic management in heterogeneous transport networks / O. Ye. Fedorovych, N. V. Yeremenko //** Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – No. 58 (1167). – P. 109–115. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0023.

Formulated and solved an actual scientific and applied task of methods and model building of information technology of cargo management in a products supply and marketing logistics system in geographically dispersed participants in the supply chain, as well as the complex channels of delivery in a heterogeneous transport network. Was developed the method for forming the structure of the supply and marketing chain in diverse transport network, which, unlike the existing ones, takes into account a variety of storage places, distribution centers and transshipment points and is based on the integrated use of cluster analysis, multi-criteria optimization, fuzzy logic and enumeration theory, which improves the efficiency of logistics freight management. A method for calculating the basic characteristics of freight using multiphase simulation model that takes into account the intensity of freight traffic in the distribution centers and the availability of additional transshipment points in a heterogeneous transport network that allows justifying the costs associated with loading and warehousing is offered. Described the model of freight management using fractals and agent-based modeling, the composition (the system organization) and set the control algorithm system. Proposed formation sequence of the control fractal model in which the hierarchy corresponds to the hierarchy of the fractal logistics chain. Formed an architecture of applied information technology of distributed supply chain and marketing logistics management, which consists of the following components: a block of modeling the delivery channels structure; discrete event simulation block; agent-based modeling block.

**Keywords:** diverse transport network, multimodal freight, transshipment point, warehousing, sales management, fractals, agents, information technology.

ЗМІСТ

<i>Годлевский М. Д., Рубин Э. Е., Голоскокова А. А.</i> Динамическая модель планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения .....	3
<i>Tkachuk M. V., Gamzaev R. A., Martinkus I. O., Ianushkevych S. D.</i> Methods and tools for dynamic requirements catalog management in agile software development .....	7
<i>Петрасова С. В., Хайрова Н. Ф.</i> Логико-лингвистическая модель идентификации семантически эквивалентных коллокаций .....	14
<i>Безменова О. Н., Гамаюн И. П., Безменов Н. И.</i> Показатели степени связи между номинальными признаками .....	18
<i>Куценко А. С., Коваленко С. В., Товажнянский В. И.</i> Структурный и параметрический синтез системы стабилизации квазистатического технологического процесса .....	25
<i>Северин В. П., Оверьянова Л. В., Омеляненко О. В.</i> Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии .....	29
<i>Мазманишвили А. С., Решетняк Н. Г., Сидоренко А. Ю., Чертищев И. А.</i> Использование спадающего магнитного поля соленоида для управления параметрами электронного пучка, формируемого магнетронной пушкой .....	33
<i>Александрова Т. Е.</i> Параметрический синтез цифровой системы наведения танковой зенитной установки .....	37
<i>Азаренков В. И., Майко И. М.</i> Влияние конструкции радиоэлектронной аппаратуры на начало регулярного теплового режима .....	41
<i>Мазманишвили А. С., Сидоренко А. Ю.</i> Алгоритм повышения порядка стационарного стохастического марковского поля на плоскости .....	48
<i>Хацько Н. Є.</i> Дослідження залежності точності вирішення термінальної задачі від вибору параметру синтезу .....	52
<i>Лубенец С. В., Павленко Е. П., Харций Е. Н.</i> Проблемы определения зон спроса (предложения) в сильных ценовых трендах .....	57
<i>Назаренко О. М.</i> Ідентифікація та прогнозування стаціонарних слабо формалізованих процесів з невідомими входами .....	62
<i>Bezmenov M. I., Potapenko Y. O., Dvornik K. O.</i> A Unity 3d engine plugin for creating static ecosystem in game applications .....	67
<i>Прохоров А. В., Прохоров В. П., Матюшко А. О.</i> Облачная платформа разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений .....	72
<i>Рубин Э. Е., Годлевский М. Д., Бараин В. С.</i> Структурный синтез модели зрелости SPICE Integration .....	77
<i>Куценко А. С., Годлевский И. М.</i> Структура модели координации организационного управления территориально распределенными логистическими системами дистрибуции .....	82
<i>Сітнікова О. А., Почебут М. В.</i> Розробка системи підтримки прийняття рішень для багатопрофільної медичної допомоги .....	86
<i>Шевченко С. В., Эгоянц А. А.</i> Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы .....	91
<i>Карпенко В. В., Ахмадов Р. Х.</i> Транспортная задача линейного программирования с нечетким спросом .....	97
<i>Копп А. М., Орловский Д. Л.</i> Об одном подходе к решению задачи оптимизации структуры бизнес-процессов предприятия .....	102
<i>Федорович О. Є., Єременко Н. В.</i> Управління логістикою в різномірних транспортних мережах .....	109
Реферати .....	116
Рефераты .....	119
Abstracts .....	123

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Системний аналіз, управління  
та інформаційні технології

№ 58 (1167) 2015

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 «ХПІ».  
Кафедра системного аналізу і управління.  
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид № 58–15

Підп. до друку 28.12.2015 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,0. Облік.-вид. арк. 10,9.  
Тираж 100 пр. Зам. № 31296. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, віл Фрунзе, 21

---

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua