

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Системний
аналіз, управління та
інформаційні технології**

№ 44 (1320) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: System
analysis, control and
information technology**

No. 44 (1320) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 44 (1320) 2018. — 88 с. — ISSN 2079-0023.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі системного аналізу та управління технічними, техніко-економічними і соціальними системами, синтезу систем керування. Публікуються статті, що стосуються розробки інтелектуальних систем, застосування математичного моделювання в техніці, лінгвістиці та економіці, впровадження інформаційних технологій і розробки програмного забезпечення.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі системного аналізу, управління і комп'ютерних технологій.

The publication is devoted to the coverage of achievements in the field of system analysis and management of technical, techno-economic and social systems, the synthesis of control systems. Articles are published on the development of intelligent systems, the application of mathematical modeling in technic, linguistics and economics, the introduction of information technology and software development.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

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». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну бази даних OCLC WorldCat (США), Eurasian Scientific Journal Index (Казахстан), індексується Research Bib (Японія), CiteFactor (Academic Scientific Journals), SIS (Scientific Indexing Services), General Impact Factor (Індія) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://samit.khpi.edu.ua/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Годлевський М. Д., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Безменов М. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Богомолів С., доц., Австралійський національний університет, Австралія

Гамаюн І. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Дідманідзе І., проф., Батумський держ. ун-т ім. Шота

Руставелі, Грузія

Золотарьова І. О., проф., ХНЕУ, Україна

Куценко О. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Любчик Л. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Павлов О. А., проф., НТУУ «КПІ», Україна

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Северин В. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ткачук М. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Хайрова Н. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шаронова Н. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editor-in-chief

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Godlevskiy M. D., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Bezmenov M. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Bogomolov S., Assistant Professor, Australian National University, Australia

Gamayun I. P., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Didmanidze I., prof., Batumi Shota Rustaveli State University,

Georgia

Zolotaryova I. O., prof., KhNUE, Ukraine

Kutsenko O. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lyubchik L. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Pavlov O. A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Severin V. P., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tkachuk M. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Khairova N. F., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Sharonova N. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 10 від 22 грудня 2018 р.

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, И. В. КОСТЯНИК

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗАТОРА КОСМИЧЕСКОЙ СТУПЕНИ С5М РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ЦИКЛОН-3» НА АКТИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ

Рассматривается задача выбора численных значений варьируемых параметров стабилизатора космической ступени С5М ракеты-носителя «Циклон-3» на активном участке траектории. В настоящее время для решения задач параметрического синтеза аналоговых и цифровых регуляторов нестационарных динамических объектов используется метод «замороженных коэффициентов», в соответствии с которым активный участок траектории полета разбивается на отдельные участки, на каждом из которых массовые, инерционные и геометрические характеристики ступени считаются неизменными, иными словами, в каждый отдельный момент времени считаются неизменными значения переменных во времени коэффициентов математической модели возмущенного движения ступени, а также значения возмущающих сил и моментов, действующих на ступень. Предполагается, что устойчивость ступени в каждый отдельный момент активного участка полета обеспечивает устойчивость полета на активном участке в целом. Данный метод, во-первых, не имеет строгого математического обоснования и, во-вторых, не в состоянии обеспечить непрерывно возрастающих требований к точности регуляторов. Изложенный в настоящей статье метод параметрического синтеза регуляторов нестационарных объектов основан на отыскании значений варьируемых параметров регулятора, доставляющих минимум интегральному квадратичному функционалу, вычисляемому на решениях математической модели замкнутой системы управления. При этом алгоритм параметрического синтеза включает целенаправленный выбор весовых коэффициентов функционала, а поиск минимума функционала осуществляется с помощью программного продукта Optimization Toolbox в среде MATLAB или продукта Minimize в среде MATHCAD. Предлагаемый метод параметрического синтеза стабилизатора позволяет повысить быстродействие замкнутой системы стабилизации и существенно снизить статическую ошибку бокового смещения центра масс. Проведено сравнительное исследование процессов стабилизации космической ступени С5М ракеты-носителя «Циклон-3» со штатным стабилизатором и стабилизатором, синтезированным с помощью предлагаемого метода, которое приводит к выводу о существенном повышении точности стабилизации космической ступени при использовании изложенного метода параметрического синтеза.

Ключевые слова: космическая ступень ракеты-носителя, активный участок полета, метод «замороженных коэффициентов», параметрический синтез стабилизатора, аддитивный интегральный квадратичный функционал.

Т. Є. АЛЕКСАНДРОВА, І. В. КОСТЯНИК

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СТАБІЛІЗАТОРА КОСМІЧНОЇ СТУПЕНІ С5М РАКЕТИ-НОСІЯ «ЦИКЛОН-3» НА АКТИВНІЙ ДІЛЯНКІ ТРАЄКТОРІЇ

Розглядається задача вибору чисельних значень варійованих параметрів стабілізатора космічного ступеня С5М ракети-носія «Циклон-3» на активній ділянці траєкторії. В даний час для вирішення задач параметричного синтезу аналогових і цифрових регуляторів нестационарних динамічних об'єктів використовується метод «заморожених коефіцієнтів», відповідно до якого активна ділянка траєкторії польоту розбивається на окремі ділянки, на кожному з яких масові, інерційні і геометричні характеристики ступеню вважаються незмінними, іншими словами, в кожен окремих момент часу вважаються незмінними значення змінних в часі коефіцієнтів математичної моделі збуреного руху ступеня, а також значення сил, що обурюють і моментів, що діють на ступінь. Передбачається, що стійкість ступеню в кожен окремих момент активної ділянки польоту забезпечує стійкість польоту на активній ділянці в цілому. Даний метод, по-перше, не має строгого математичного обґрунтування і, по-друге, не в змозі забезпечити безперервно зростаючих вимог до точності регуляторів. Викладений в цій статті метод параметричного синтезу регуляторів нестационарних об'єктів заснований на знаходженні значень варійованих параметрів регулятора, що доставляють мінімум інтегрального квадратичного функціоналу, який обчислюється на рішеннях математичної моделі замкнутої системи управління. При цьому алгоритм параметричного синтезу включає цілеспрямований вибір вагових коефіцієнтів функціонала, а пошук мінімуму функціоналу здійснюється за допомогою програмного продукту Optimization Toolbox в середовищі MATLAB або продукту Minimize в середовищі MATHCAD. Запропонований метод параметричного синтезу стабілізатора дозволяє підвищити швидкодію замкнутої системи стабілізації і істотно знизити статичну помилку бокового зміщення центру мас. Проведено порівняльне дослідження процесів стабілізації космічної ступені С5М ракети-носія «Циклон-3» зі штатним стабілізатором і стабілізатором, синтезованим за допомогою запропонованого методу, яке призводить до висновку про істотне підвищення точності стабілізації космічної ступені при використанні викладеного методу параметричного синтезу.

Ключові слова: космічна ступінь ракети-носія, активна ділянка польоту, метод «заморожених коефіцієнтів», параметричний синтез стабілізатора, адитивний інтегральний квадратичний функціонал.

T. YE. ALEKSANDROVA, I. V. KOSTIANYK

THE PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE C5M COSMIC STAGE STABILIZER OF THE CYCLONE-3 CARRIER ROCKET IN THE ACTIVE PART OF TRAJECTORY

The problem of choosing the numerical values of the variable parameters of the stabilizer of the C5M cosmic stage of the Cyclone-3 carrier rocket in the active part of the trajectory is considered. Currently, to solve the parametric synthesis problems of analog and digital regulators of non-stationary dynamic objects, the "frozen coefficients" method is used, according to which the active part of the flight trajectory is divided into separate sections, at each of which the mass, inertial and geometric characteristics of the stage are considered constant, in words, at each moment in time, the values of the coefficients of the coefficients of the mathematical model of the perturbed motion stage, as well as the value of disturbing forces and moments acting on the stage. It is assumed that the stability of the stage at each moment of the active part of the flight ensures the stability of the flight in the active area as a whole. This method, firstly, does not have a rigorous mathematical justification and, secondly, is not able to provide continuously increasing requirements for the accuracy of regulators. The method of parametric synthesis of regulators of non-stationary objects set out in this article is based on finding the values of the variable parameters of the regulator delivering a minimum to the integral quadratic functional calculated on the solutions of the mathematical model of a closed control system. In this case, the parametric synthesis algorithm includes a targeted choice of the functional weighting coefficients, and the minimum of the functional is searched for using the Optimization Toolbox software in the MATLAB or the Minimize software in the MATHCAD. The proposed method of parametric synthesis of the stabilizer allows to increase the speed of the closed stabilization system and significantly reduce the static error of the lateral displacement of the center of mass. A comparative research of the stabilization processes of the C5M cosmic stage of the Cyclone-3 carrier rocket with a standard stabilizer and a stabilizer synthesized by the proposed method leads to the

conclusion that the accuracy of the stabilization of the cosmic stage is significantly improved when using the above parametric synthesis method.

Keywords: the cosmic stage of the carrier rocket, the active phase of the flight, the "frozen coefficients" method, the parametric synthesis of the stabilizer, the additive integral quadratic functional.

Введение и постановка задачи. Название «космические ступени» (КС) объединяет орбитальные головные части (ОГЧ) боевых межконтинентальных баллистических ракет (МБР) и доразгонные блоки (ДБ) ракет-носителей (РН) космических аппаратов. Например, первые две ступени РН «Циклон-3» представляют собой МБР 8К69, в которой ОГЧ заменена третьей ступенью С5М, являющейся КС.

Значительная часть свободного полета КС проходит на высотах более 80 км. При движении с работающим маршевым жидкостным реактивным двигателем (ЖРД) стабилизация КС осуществляется реактивными силами, создаваемыми непрерывно путем поворота камеры сгорания ЖРД. При движении с неработающим маршевым двигателем на больших высотах – с использованием релейной реактивной системы, исполнительными органами которой являются реактивные двигатели малой тяги.

Важной особенностью КС является их небольшое удлинение, под которым понимают отношение длины КС к ее диаметру. Как правило, такие объекты характеризуются значительной собственной неустойчивостью. Поэтому, основной проблемой параметрического синтеза стабилизатора КС является обеспечение ее устойчивости на участках полета с работающим маршевым ЖРД.

Действительно, топливные баки КС С5М выполнены тороидальными со значительным диаметром (2,7 м) и сравнительно небольшой высотой (1,6 м), что обуславливает большую свободную поверхность и малую глубину жидкости. Для устранения дестабилизирующего влияния жидкости в баки горючего и окислителя С5М было установлено по 12 радиальных перегородок с закрепленными на них демпфирующими элементами. Введение дополнительных конструкций в баки неблагоприятно отражается на весовых и энергетических характеристиках КС [1].

Параметрический синтез стабилизаторов ступеней МБР и РН осуществляется с использованием метода «замороженных коэффициентов», в соответствии с которым активный участок траектории полета разбивается на отдельные участки, на каждом из которых массовые, инерционные и геометрические характери-

стики ступени считаются неизменными, иными словами, в каждый отдельный момент времени считаются неизменными («замороженными») значения переменных во времени коэффициентов математической модели возмущенного движения ступени, а также значения возмущающих сил и моментов, действующих на ступень. Предполагается, что устойчивость ступени в каждый отдельный момент активного участка полета обеспечивает устойчивость полета на активном участке в целом. Такое предположение ничем не обосновано, хотя на практике нередко приводит к положительным результатам.

В работе авторов [2] показано, что развитие методов современной теории управления, создание высокотехнологичной элементной базы систем автоматического управления и наличие высокоэффективных программных продуктов MATLAB и MATHCAD позволяет отказаться от метода «замороженных коэффициентов» при решении задач параметрического синтеза стабилизаторов МБР и РН, что приводит к повышению точности стабилизируемого полета. Идея, изложенного в [2] метода, состоит в отыскании значений варьируемых параметров стабилизатора, доставляющих минимум интегральному квадратичному функционалу, вычисляемому на решениях математической модели возмущенного движения ракеты вдоль активного участка траектории полета.

Целью настоящей статьи является демонстрация эффективности предполагаемого метода параметрического синтеза стабилизатора на примере космической ступени С5М ракеты-носителя «Циклон-3», эксплуатация которых с 1977 года успешно продолжается до настоящего времени [1, 3, 4, 11].

Параметрический синтез стабилизатора КС С5М. Математическая модель возмущенного движения КС С5М ракеты-носителя, «Циклон-3» приведена в работе [1].

С учетом мероприятий по дестабилизирующему влиянию жидкости на движение ступени, описанных во введении, влияние жидкости было практически исключено, что позволило представить математическую модель возмущенного движения ступени в канале рыскания в следующем виде [7, 10]

Таблица 1 – Значения коэффициентов математической модели (1)

t, c	$a'_{z\psi}, M \cdot c^{-1}$	$a_{z\psi}, M \cdot c^{-2}$	$a_{z\delta}, M \cdot c^{-2}$	$a'_{\psi\psi}, c^{-1}$	$a'_{\psi\delta}, c^{-2}$	$f_z(t), M \cdot c^{-2}$	m_{ψ}, c^{-2}
0	-0.0196	0	0.31	-0.012	-0.643	0	0
1	-0.0196	-16.2	0.313	-0.0114	-0.610	0.025	0.037
2	-0.0193	-16.4	0.316	-0.0107	-0.594	0.051	0.074
16	-0.0213	-17.7	0.338	-0.011	-0.612	0.048	0.070
32	-0.0245	-19.6	0.374	-0.0116	-0.640	0.052	0.074
48	-0.0285	-21.9	0.418	-0.0114	-0.640	0.056	0.080
64	-0.0334	-24.8	0.473	-0.0131	-0.694	0.061	0.087
80	-0.0355	-28.6	0.550	-0.0117	-0.744	0.067	0.099
96	-0.0525	-33.7	0.643	-0.0089	-0.505	0.071	0.104
112	-0.0678	-41.02	0.783	-0.008	-0.468	0.0834	0.133

$$\begin{aligned} \ddot{z}(t) &= a'_{z\psi}\dot{\psi}(t) + a_{z\psi}\psi(t) + a_{z\delta}\delta(t) + f_z(t); \\ \ddot{\psi}(t) &= a'_{\psi\psi}\dot{\psi}(t) + a_{\psi\delta}\delta(t) + m_{\psi}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где $z(t)$ – боковое смещение центра масс ступени относительно плоскости орбиты; $\psi(t)$ – угол поворота продольной оси ступени относительно плоскости орбиты; $\delta(t)$ – угол отклонения оси маршевого ЖРД от продольной оси ступени; $f_z(t)$ – приведенная возмущающая сила, приложенная к центру масс ступени; $m_{\psi}(t)$ – приведенный возмущающий момент, поворачивающий ступень относительно ее центра масс; $a'_{z\psi}$, $a_{z\psi}$, $a_{z\delta}$, $a'_{\psi\psi}$, $a_{\psi\delta}$ – переменные во времени коэффициенты математической модели (1), значения которых приведены в табл. 1.

Математическая модель аналогового стабилизатора описывается уравнением [4, 6, 7, 12]

$$\delta(t) = k_z z(t) + k_z \dot{z}(t) + k_{\psi} \psi(t) + k_{\psi} \dot{\psi}(t), \quad (2)$$

где k_z, k_z, k_{ψ} и k_{ψ} – варьируемые параметры стабилизатора.

Дифференциальные уравнения (1) в совокупности с соотношением (2) образуют математическую модель возмущенного движения замкнутой системы стабилизации, характеристическое уравнение которой записывается в виде

$$\begin{aligned} s^4 - (a_{z\delta}k_z + a'_{\psi\psi} + a_{\psi\delta}k_{\psi})s^3 + \\ + (Mk_z - a_{\psi\delta}k_{\psi} - a_{z\delta}k_z)s^2 - \\ - (a_{z\psi}a_{\psi\delta}k_z - Mk_z)s - a_{\psi\delta}a_{z\psi}k_z = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Структурная схема замкнутой системы стабилизации (ЗСС) ракеты в канале рыскания приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: ОС – объект стабилизации; АС_z – автомат боковой стабилизации; АС_ψ – автомат угловой стабилизации.

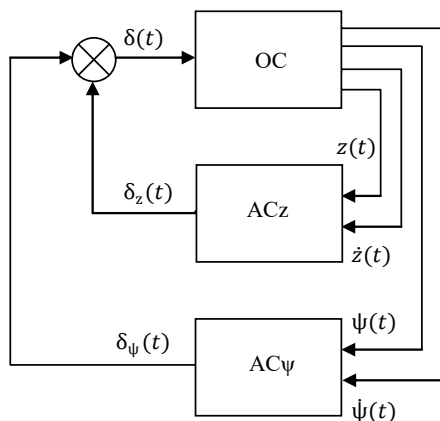


Рис. 1. Структурная схема ЗСС в канале рыскания

Анализ рис. 1 приводит к выводу, что схема содержит два замкнутых контура – внутренний контур боковой стабилизации и внешний контур угловой стабилизации, причем сигналы, формируемые АС_z и АС_ψ, записываются в виде

$$\delta_z(t) = k_z z(t) + k_z \dot{z}(t); \quad (4)$$

$$\delta_{\psi}(t) = k_{\psi} \psi(t) + k_{\psi} \dot{\psi}(t). \quad (5)$$

Разомкнем внешний контур обратной связи, положив в уравнении (3) $k_{\psi} = k_{\psi} = 0$. Тогда характеристическое уравнение замкнутого внутреннего контура принимает вид

$$\begin{aligned} s^4 - (a_{z\delta}k_z + a'_{\psi\psi})s^3 + (Mk_z - a_{z\delta}k_z)s^2 - \\ - (a_{z\psi}a_{\psi\delta}k_z - Mk_z)s - a_{\psi\delta}a_{z\psi}k_z = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $M = a_{z\delta}a'_{\psi\psi} - a_{\psi\delta}a'_{z\psi}$.

В характеристическом уравнении (6) положим $s = j\omega$, выделим в полученном соотношении действительную и мнимую части, приравняем их нулю и запишем решение полученной системы двух алгебраических уравнений относительно варьируемых параметров:

$$k_z = \frac{(a_{z\delta}\omega^2 - a_{\psi\delta}a_{z\psi} - Ma'_{\psi\psi})\omega^4}{(a_{z\delta}\omega^2 - a_{\psi\delta}a_{z\psi})^2 + M^2\omega^2}; \quad (7)$$

$$k_z = \frac{-(a_{z\delta}\omega^2 - a_{\psi\delta}a_{z\psi})a'_{\psi\psi}\omega^2 + M\omega^4}{(a_{z\delta}\omega^2 - a_{\psi\delta}a_{z\psi})^2 + M^2\omega^2}. \quad (8)$$

Изменяя ω от нуля до бесконечности, с помощью соотношений (7) и (8) построим границы области устойчивости замкнутой системы боковой стабилизации в плоскости варьируемых параметров (k_z, k_z) для моментов полета $t_1 = 1c$; $t_2 = 64c$; $t_3 = 112c$, представленные на рис. 2. Пересечение этих областей

$$G_{kz} = G_{kz}(t_1) \cap G_{kz}(t_2) \cap G_{kz}(t_3) \quad (9)$$

заштриховано и образует множество допустимых значений варьируемых параметров k_z и k_z (рис. 2),

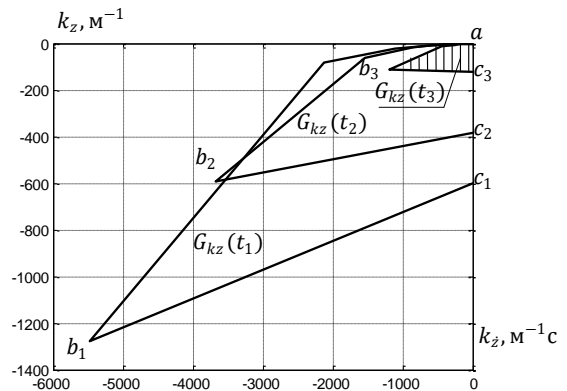


Рис. 2. Множество допустимых значений G_{kz} варьируемых параметров k_z и k_z

а множество G_{kz} является замкнутым, как и каждая из составляющих его областей $G_{kz}(t_i)$. Точка a каждой из его областей $G_{kz}(t_i)$ соответствует $\omega_a = 0$. Точка b соответствует значению частоты

$$\omega_b = \sqrt{\frac{a_{\psi\delta} a_{z\psi}}{a_{z\delta}}},$$

а точка c – значению частоты

$$\omega_c = \sqrt{\frac{a_{\psi\delta} a_{z\psi} + M a'_{\psi\psi}}{a_{z\delta}}}.$$

На множестве G_{kz} выбираем точку (k_z^0, k_z^0) и подставим в характеристическое уравнение (3) $k_z = k_z^0 = -50\text{м}^{-1}$ и $k_z = k_z^0 = -5\text{м}^{-1} \cdot \text{с}$, произведем в полученном соотношении замену $s = j\omega$ и получим соотношения для построения границы области устойчивости замкнутой системы (1), (2) в плоскости варьируемых параметров (k_ψ, k_ψ) :

$$k_\psi = \frac{1}{a_{\psi\delta} \omega^2} \cdot [-\omega^4 + (Mk_z^0 - a_{z\delta} k_z^0) \omega^2 + a_{\psi\delta} a_{z\psi} k_z^0]; \quad (10)$$

$$k_\psi = \frac{1}{a_{\psi\delta} \omega^2} \cdot [-(a_{z\delta} k_z^0 + a'_{\psi\psi}) \omega^2 + (a_{\psi\delta} a_{z\psi} k_z^0 - M_{\psi\delta} k_z^0)]. \quad (11)$$

На рис. 3 представлены области устойчивости замкнутой системы $G_{k\psi}(t_i), i = 1, 2, 3$ в плоскости (k_ψ, k_ψ) , пересечение которых

$$G_{k\psi} = G_{k\psi}(t_1) \cap G_{k\psi}(t_2) \cap G_{k\psi}(t_3) \quad (12)$$

представляет собой заштрихованное множество допустимых параметров k_ψ и k_ψ .

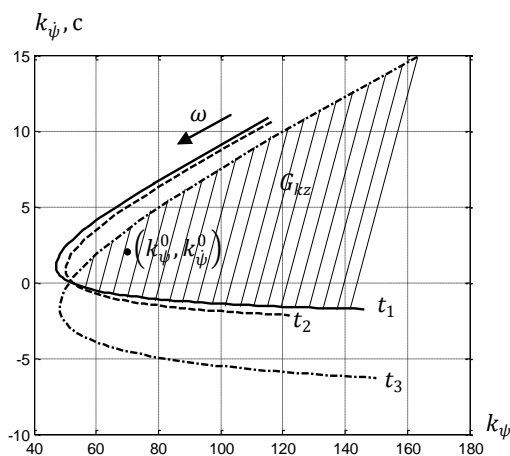


Рис. 3. Множество допустимых значений $G_{k\psi}$ варьируемых параметров k_ψ и k_ψ

На множестве $G_{k\psi}$ выберем точку (k_ψ^0, k_ψ^0) и построим стабилизируемые процессы замкнутых систем (1), (2) с переменными во времени параметрами при

$k_z = k_z^0 = -50\text{м}^{-1}$, $k_z = k_z^0 = -5\text{м}^{-1} \cdot \text{с}$, $k_\psi = k_\psi^0 = 70$, $k_\psi = k_\psi^0 = 2\text{с}$, приведенные на рис. 4.

Анализ процессов стабилизации, приведенных на рис. 4, показывает наличие значительной статической ошибки. Эта ошибка является максимально возможной и обусловлена предположением о том, что внешние возмущения являются максимально допустимыми и однонаправленными. В реальных условиях сила и направление ветра в верхних слоях атмосферы непрерывно изменяются, поэтому реальная статическая ошибка стабилизации корпуса космической ступени во много раз меньше, чем полученная оценка при использовании принципа минимакса [8].

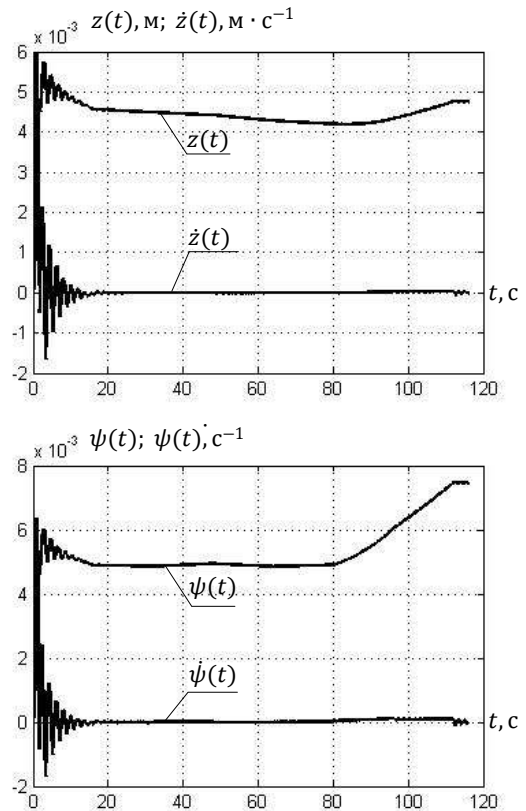


Рис. 4. Процессы стабилизации соответствующие стартовой точке K^0

Возрастание статической ошибки стабилизации КС, наблюдаемое после 80 с активной фазы полета ступени, обусловлено возрастанием величин приведенных возмущений $f_z(t)$ и $m_\psi(t)$, причем это происходит вследствие уменьшения массы и момента инерции КС за счет расхода горючего и окислителя.

Точность стабилизации КС количественно можно оценивать величиной интегрального квадратичного функционала

$$I(K) = \int_0^T [a_1^2 z^2(t) + a_2^2 \dot{z}^2(t) + a_3^2 \psi^2(t) + a_4^2 \dot{\psi}^2(t)] dt, \quad (13)$$

вычисляемого на решениях математической модели (1), (2). Весовые коэффициенты функционала (13) подлежат выбору в соответствии с формулами [2, 9]:

$$a_1 = \frac{z_{max}}{I_z^* \left(\frac{z_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\dot{z}_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\psi_{max}^2}{I_\psi^*} + \frac{\dot{\psi}_{max}^2}{I_\psi^*} \right)} \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{\dot{z}_{max}}{I_z^* \left(\frac{z_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\dot{z}_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\psi_{max}^2}{I_\psi^*} + \frac{\dot{\psi}_{max}^2}{I_\psi^*} \right)} \quad (15)$$

$$a_3 = \frac{\psi_{max}}{I_\psi^* \left(\frac{z_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\dot{z}_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\psi_{max}^2}{I_\psi^*} + \frac{\dot{\psi}_{max}^2}{I_\psi^*} \right)} \quad (16)$$

$$a_4 = \frac{\dot{\psi}_{max}}{I_\psi^* \left(\frac{z_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\dot{z}_{max}^2}{I_z^*} + \frac{\psi_{max}^2}{I_\psi^*} + \frac{\dot{\psi}_{max}^2}{I_\psi^*} \right)} \quad (17)$$

где z_{max} , \dot{z}_{max} , ψ_{max} , $\dot{\psi}_{max}$ – максимальные значения соответствующих переменных в переходном процессе. Из рассмотрения рис. 4 можно положить: $z_{max} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\dot{z}_{max} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $\psi_{max} = 8 \cdot 10^{-3}$; $\dot{\psi}_{max} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Через I_z^* , I_z^* , I_ψ^* и I_ψ^* в соотношениях (14)–(17) обозначены минимальные значения частных функционалов

$$I_z(K) = \int_0^T z^2(t) dt, \quad (18) \quad I_z(K) = \int_0^T \dot{z}^2(t) dt, \quad (19)$$

$$I_\psi(K) = \int_0^T \psi^2(t) dt, \quad (20) \quad I_\psi(K) = \int_0^T \dot{\psi}^2(t) dt, \quad (21)$$

вычисляемых на решениях математической модели (1), (2).

В соотношениях (13), (18)–(21) через T обозначена продолжительность активного участка полета, значение которой для ступени С5М составляет $T = 116 \text{ с}$, а через K – вектор варьируемых параметров стабилизатора

$$K = [k_z, k_{\dot{z}}, k_\psi, k_{\dot{\psi}}], \quad (22)$$

принадлежащий множеству G_k , представляющего собой объединение множеств G_{kz} и $G_{k\psi}$

$$K \in G_k = G_{kz} \cup G_{k\psi}. \quad (23)$$

Для отыскания минимальных значений частных функционалов на множестве G_k целесообразно использовать программные продукты Optimization Toolbox в среде MATLAB или Minimize в среде MATHCAD. В качестве стартовой выберем точку

$$K^0 = [k_z^0, k_{\dot{z}}^0, k_\psi^0, k_{\dot{\psi}}^0] \in G_k = G_{kz} \cup G_{k\psi}.$$

В результате получаем $I_z^* = 2,466 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}$; $I_z^* = 2,520 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $I_\psi^* = 3,340 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $I_\psi^* = 2,901 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Подставляя полученные величины в соотношения (14)–(17), получаем значения весовых коэффициентов аддитивного функционала (13): $a_1 = 49,16$; $a_2 = 58,06$; $a_3 = 0,51$; $a_4 = 46,80$.

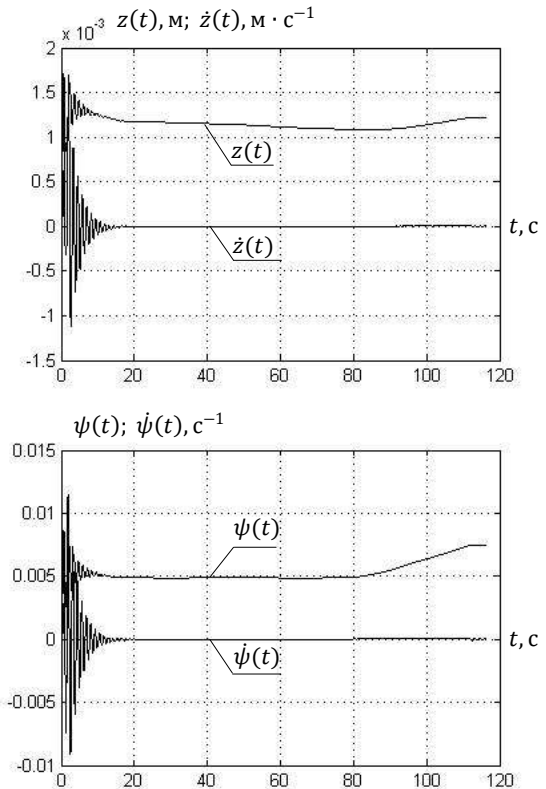


Рис. 5. Процессы стабилизации соответствующие оптимальной точке K^*

Последним этапом решения задачи параметрического синтеза является выбор значений варьируемых параметров стабилизатора

$$K^* = [k_z^*, k_{\dot{z}}^*, k_\psi^*, k_{\dot{\psi}}^*] \in G_k = G_{kz} \cup G_{k\psi},$$

доставляющих минимум аддитивному функционалу (13) на активном участке полета ступени.

В работе [5] показано, что минимум функционала (13) на множестве G_k является единственным. Значения варьируемых параметров стабилизатора составляют: $k_z^* = -190,02 \text{ м}^{-1}$; $k_{\dot{z}}^* = -19,51 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}$; $k_\psi^* = 69,23$; $k_{\dot{\psi}}^* = 0,01 \text{ с}$.

Процессы стабилизации, соответствующие полученным значениям варьируемых параметров стабилизатора, приведены на рис. 5.

Сравнение процессов, приведенных на рис. 4 и рис. 5, приводит к выводу о том, что предлагаемый метод параметрического синтеза стабилизатора позволяет повысить быстродействие замкнутой системы стабилизации и существенно снизить статическую ошибку бокового смещения центра масс. Так, процессы успокоения КС после её отделения сократились в среднем на 25 % и не превышают 10 с. Статическая ошибка бокового смещения КС не превышает $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ по сравнению с $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, соответствующему

стартовой точке. Если значение функционала (13) в точке $K^0 \in G_k$ составляет $I(K^0) = 5,7$ с, то в точке $K^* \in G_k$ оно составляет $I(K^*) = 0,725$ с.

Выводы. Предлагаемый в работе метод параметрического синтеза стабилизаторов космических ступеней МБР и РН основан на вычислении значений аддитивного интегрального квадратичного функционала, являющегося количественной оценкой точности стабилизации, с последующим отысканием весовых коэффициентов и использованием программных продуктов Optimization Toolbox и Minimize для отыскания значений варьируемых констант алгоритма стабилизации, доставляющих минимум интегральному квадратичному функционалу. На примере космической ступени С5М ракеты-носителя «Циклон-3» показано, что решение задачи параметрического синтеза стабилизатора с помощью изложенного метода позволяет до 25 % повысить быстродействие и в несколько раз увеличить точность процессов стабилизации КС.

Список литературы

- Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шептун Ю. Д. *Ракета как объект управления*. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. 544 с.
- Александрова Т. Е., Костяник И. В. К задаче параметрического синтеза стабилизатора нестационарного объекта. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Транспортне машинобудування*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. № 29(1301). С. 3–6.
- Котович В. И. *НПП «Хартрон-Аркос». Хроника дат и событий 1959–2012 гг.* Харьков: Хартрон–Аркос, 2012. 259 с.
- Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шептун Ю. Д. *Динамическое проектирование ракет*. Днепропетровск: ДГУ, 2010. 264 с.
- Александрова Т. Е. О единственности решения задачи параметрического синтеза линейной динамической системы с интегральным квадратичным критерием оптимальности. *Системи обробки інформації*. Харьков: ХУПС, 2013. Вип. 7(114). С. 116–120.
- Александров Е. Е., Козлов Е. П., Кузнецов Б. И. *Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Том 2. Автоматичне керування рухом літальних апаратів*. Харків: НТУ «ХПИ», 2006. 528 с.
- Айзенберг Я. Е., Сухоробрий В. Г. *Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
- Кунцевич В. М. *Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации*. К: Наукова думка, 2006. 264 с.
- Александров Е. Е., Александрова Т. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. 2004. № 2. С. 23–26.
- Рабинович Б. И. *Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 1975. 274 с.
- Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков М. В., Шептун Ю. Д. *Ракети-носії і космічні ступені ракет як об'єкти керування*. Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕСС, 2004. 564 с.
- Колесников К. С. *Динамика ракет*. М.: Машиностроение, 1980. 376 с.

References (transliterated)

- Igdalov I. M., Kuchma L. D., Polyakov N. V., Sheptun Yu. D. *Raketa kak ob'ekt upravleniya* [Rocket as an object of control]. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2004. 544 p.
- Aleksandrova T. E., Kostyanik I. V. K zadache parametrycheskoho synteza stabylyzatora nestatsyonarnoho ob'ekta [On the problem of parametric synthesis of a stabilizer of a non-stationary object]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Transportne mashynobuduvannya [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Transport engineering]. Khar'kov, NTU «KhPI» Publ., 2018, no. 29(1301), pp. 3–6.
- Kotovych V. I. *NPP «Khartron-Arkos». Khronika dat i sobytyi 1959–2012 gg* [NPP "Hartron-Arkos". Chronicle of dates and events 1959 - 2012]. Khar'kov, Khartron–Arkos Publ., 2012. 259 p.
- Igdalov I. M., Kuchma L. D., Polyakov N. V., Sheptun Yu. D. *Dinamicheskoye proyektirovaniye raket* [Dynamic design of rockets]. Dnepropetrovsk, DGU Publ., 2010. 264 p.
- Aleksandrova T. E. O yedinstvennosti resheniya zadachi parametrycheskogo synteza lineynoy dinamicheskoy sistemy s integral'nym kvadratichnym kriteriyem optimal'nosti [On the uniqueness of the solution of the problem of parametric synthesis of a linear dynamical system with an integral quadratic optimality criterion]. *Sistemi obrobki informatsii* [Processing Systems Information]. Khar'kov, KHUPS Publ., 2013, issue 7(114), pp. 116–120.
- Aleksandrov Ye. Ye., Kozlov E. P., Kuznyeczov B. I. *Avtomatychne keruvannya ruhomymy ob'ektamy i tehnologichnymy procesamy. Tom 2. Avtomatychne keruvannya ruhom litalnyh aparativ* [Automatic control of moving objects and technological processes. Volume 2. Automatic control of the movement of aircraft]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2006. 528 p.
- Ayzenberg YA. Ye., Sukhorebryy V. G. *Proyektirovaniye sistem stabilizatsii nositeley kosmicheskikh apparatov* [Designing systems for stabilization of spacecraft carriers]. M.: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 224 p.
- Kuntsevich V. M. *Upravlenie v usloviyah neopredelenosti: garantirovannyye rezultaty v zadachah upravleniya i identifikatsii* [Management under uncertainty: guaranteed results in management and identification tasks]. K. Naukova dumka, 2006. 264 p.
- Aleksandrov E. E., Aleksandrova T. E. *Vyibor optimiziruemogo funktsionala v zadachah parametrycheskogo synteza sistem stabilizatsii* [Selection of an optimized functional in problems of parametric synthesis of stabilization systems]. *Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie* [Artillery and small arms]. 2004, no. 2, pp. 23–26.
- Rabinovich B. I. *Vvedeniye v dinamiku raket-nositeley kosmicheskikh apparatov* [Introduction to the dynamics of launch vehicles of spacecraft]. M.: Mashinostroyeniye Publ., 1975. 274 p.
- Igdalov Y. M., Kuchma L. D., Polyakov M. V., Sheptun YU. D. *Rakety-nosiyi i kosmichni stupeni raket yak ob'yekty keruvannya* [Rocket carriers and space stages of missiles as objects of control]. Dnipropetrovsk: ART-PRESS Publ., 2004. 564 p.
- Kolesnikov K. S. *Dinamika raket* [Dynamics of rockets]. M.: Mashinostroyeniye Publ., 1980. 376 p.

Поступила (received) 05.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Александрова Тетяна Євгенівна (Александрова Татьяна Евгеньевна, Aleksandrova Tetiana Yevhenivna) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-0669>; e-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com

Костяник Ірина Віталіївна (Костяник Ирина Витальевна, Kostianyk Iryna Vitaliivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин» імені О. О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0289-2869>; e-mail: kostyanik-irina@ukr.net

А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, А. Ю. СИДОРЕНКО

РЕВЕРСНЫЕ ФУНКЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СЛУЧАЙНОГО ФУНКЦИОНАЛА-СВЕРТКИ ОТ НОРМАЛЬНОГО МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрен процесс, обладающий свойствами стационарности, нормальности и марковости. Для заданного временного интервала изучены энергетический функционал и функционал сверточного типа. При аналитическом рассмотрении задач теории вероятностей и математической статистики распространено допущение о том, что рассматриваемая задача получила своё разрешение, если построена характеристическая (производящая) функция. Однако, операция обратного преобразования Фурье или обратного преобразования Лапласа вызывает основные трудности в вычислительном отношении. Как числовая процедура преобразование Лапласа характеризуется неустойчивостью, степень которой увеличивается с ростом параметра преобразования. В работе предложен и использован подход для решения задачи статистики функционала, основанный на применении реверсных функций, что дало возможность получения аналитического выражения для производящей функции распределения случайных значений функционала-свертки. Проведен анализ статистических свойств функционала-свертки. Представлены математическое ожидание и дисперсия функционала-свертки. В данной работе плотность и интегральный закон распределения получены численно с помощью обратного преобразования Лапласа для выбранных значениях времени наблюдения T , декремента случайного процесса ν и его интенсивности σ_x^2 . Приведены зависимости плотности и функций распределения для заданных значений параметров функционалов. Из расчетов следует, что увеличение параметра $T\sigma_x^2$ приводит к расширению значений функционала-свертки в периферийные области больших отклонений. Уменьшение параметра νT приводит к локализации значений функционала-свертки во флуктуационной области $z \approx 0$. Плотность $f(z)$ симметрична относительно $z = 0$, имеет единственный максимум, две точки перегиба и экспоненциальную асимптотику на перифериях.

Ключевые слова: стационарность, нормальность, марковость, интегральные квадратичные функционалы, энергетический функционал и функционал сверточного типа, статистические свойства функционала-свертки.

О. С. МАЗМАНИШВИЛІ, Г. Ю. СИДОРЕНКО

РЕВЕРСНІ ФУНКЦІЇ ТА РОЗПОДІЛ ІМОВІРНОСТЕЙ ВИПАДКОВОГО ФУНКЦИОНАЛА-ЗГОРТКИ З НОРМАЛЬНОГО МАРКІВСЬКОГО ПРОЦЕСА

Розглядається процес, що володіє властивостями стаціонарності, нормальності та марковості. Для заданого часового інтервалу вивчено енергетичний функціонал та функціонал-згортку. При аналітичному розгляді задач теорії ймовірностей та математичної статистики є припущення, що задача, що розглядається, буде вирішена, якщо побудована характеристична (твірна) функція розподілу. Це зумовлено тим, що при складанні випадкових величин щільність розподілу є багатократною згорткою парціальних щільностей. В той час, коли твірна функція є добутком парціальних твірних функцій, тобто дія, яка більш здійснена. Але, зворотне перетворення Фур'є або зворотне перетворення Лапласа викликає основні складності в обчислювальному відношенні. Як чисельна процедура перетворення характеризується своєю нестійкістю, степінь якої зростає з параметром перетворення. В роботі використаний підхід, заснований на застосуванні реверсних функцій, що дало можливість отримання аналітичного виразу для твірної функції розподілу випадкових значень функціоналу-згортки. Проведено аналіз статистичних властивостей функціоналу-згортки. Щільність розподілу ймовірностей та інтегральний розподіл отримано чисельно з використанням зворотного перетворення Лапласа для вибраних значень часу спостереження T , декременту випадкового процесу ν та його інтенсивності σ_x^2 . Наведені залежності щільності та функцій розподілу для заданих значень параметрів функціоналів. З проведених розрахунків випливає, що збільшення параметра $T\sigma_x^2$ приводить до розширення значень функціоналу-згортки в периферійній області більших ухилень. Зменшення параметра νT призводить до локалізації значень функціоналу-згортки в межах флуктуаційної області $z \approx 0$. Щільність розподілу $f(z)$ симетрична відносно $z = 0$, має єдиний максимум, дві точки перегину та експоненціальну асимптотику на периферіях.

Ключові слова: стаціонарність, нормальність, марковість, інтегральні квадратичні функціонали, енергетичний функціонал та функціонал згорточного типу, статистичні властивості функціоналу-згортки.

O. S. MAZMANISHVILI, G. YU. SYDORENKO

REVERSAL FUNCTIONS AND PROBABILITY DISTRIBUTION OF THE PANDOM CROSS-FUNCTIONAL FROM NORMAL MARKOV PROCESS

The process, which has the properties of stationary, normality and markovity, is considered. For a given time interval, an energy functional and a cross-functional are studied in this article. In analytic consideration of the problems of probability theory and mathematical statistics, the assumption is widespread that the problem in question has been resolved if the characteristic (generating) function is constructed. However, the operation of the inverse Laplace transform causes the computational difficulties. As a numerical procedure, the inverse Laplace transform is characterized by instability, the degree of which increases with the transformation parameter. An approach based on the application of the reverse functions was proposed and used, which made it possible to obtain an analytical expression for the generating function of the distribution of random values of the cross-functional in this article. The analysis of the statistical properties of the cross functional is carried out. The density of probability distribution and the integral distribution law are obtained numerically using the inverse Laplace transform for the selected values of the observation time T , the decrement of the process ν and its intensity σ_x^2 . The dependences of the density and distribution functions for given values of the parameters of functionals are given. It follows from the calculations that an increase in the parameter $T\sigma_x^2$ leads to the expansion of the values of the functional in the peripheral regions of large deviations. Reducing the parameter νT leads to the localization of the values of the cross-functional in the fluctuation domain $z \approx 0$. The density $f(z)$ is symmetric with respect $z = 0$. It has a unique maximum, two points of inflection, and an exponential asymptotic behavior on the periphery.

Keywords: stationary, normality, markovity, integral quadratic functional, energy functional and cross-type functional, statistical properties of cross-functional.

Введение. При аналитическом рассмотрении задач теории вероятностей и математической статистики распространено допущение о том, что

рассматриваемая задача получила своё разрешение, если построена характеристическая (производящая) функция рассматриваемой случайной величины. Это

можно пояснить тем, что при сложении случайных величин искомая плотность распределения композиции есть многократная (по числу слагаемых) свертка парциальных плотностей, в то время как характеристическая функция композиции является произведением парциальных характеристических функций [1, 2], то есть операцией существенно более просто выполнимой, чем многократное интегрирование.

Однако, операция обратного преобразования Фурье или обратного преобразования Лапласа вызывает основные трудности в вычислительном отношении. Как числовая процедура преобразование Фурье характеризуется неустойчивостью, степень которой увеличивается с ростом параметра преобразования. Несмотря на большое число попыток [3, 4], к настоящему времени отсутствуют устойчивые алгоритмы обращения Фурье.

С другой стороны, автокорреляционный анализ наряду со спектральным играет большую роль в практическом применении, например, в теории сигналов. В настоящее время корреляция является наиболее широко распространенным методом обработки различных сигналов и данных (оптических и других). При всех своих различных проявлениях корреляция, по существу, является методом оценки взаимных связей, имеющих форму подобий или совпадений. Таким образом, процесс корреляции сводится к сравнению (сопоставлению) двух картин или процессов. Сопоставление картин, сигналов или процессов можно произвести, используя понятие корреляционной функции [2]. Корреляция также является неотъемлемой частью процесса свертки, который, по сути, та же корреляция двух последовательностей данных, при вычислении которой одна из последовательностей обращена во времени. Это означает, что для вычисления корреляции и свертки могут использоваться одни и те же алгоритмы.

Постановка задачи. В ряде задач возникает необходимость вычисления случайных величин, которые представляют собой квадратичные функционалы от траекторий нормального марковского процесса. Примером может служить энергетический и сверточный функционал

$$\begin{aligned} J_1[x] &= \int_0^T x^2(t) dt, \\ J_2[x] &= \int_0^T x(t)x(T-t) dt, \end{aligned} \quad (1)$$

а также различные варианты функционала $J_1[x]$, например, функционалы корреляционного и интерференционного вида [1-3].

В функционалах (1) $0 \leq t \leq T$ – временной интервал наблюдения, а под $\{x(t)\}$ понимается нормальный процесс Орнштейна-Уленбека (ОУ-процесс) [4, 5]. Стационарный, вещественный случайный ОУ-процесс имеет декремент ν , интенсивность σ_x^2 , а также безусловные нулевое

математическое ожидание и дисперсию $M[x^2(t)] = \sigma_x^2$. При этом ОУ-процесс $x(t)$ удовлетворяет стохастическому дифференциальному уравнению

$$\frac{d}{dt}x(t) + \nu x(t) = w(t), \quad (2)$$

где ν – декремент $\nu > 0$,

$w(t)$ – винеровский случайный процесс с корреляционной функцией

$$K_w(t, t') = M[w(t)w(t')] = \frac{1}{2\sigma_w^2} \min(t, t').$$

Задача о нахождении статистических свойств функционала $J_1[x]$ рассматривалась в [6, 7]. Их полное описание содержится в полученном выражении для производящей (характеристической) функции $Q_Y(\lambda)$ случайной величины $Y = J_1[x]$.

Поставим задачу о нахождении плотности распределения $f(z)$ случайных значений z функционала $Z = J_2[x]$ (1) или, что эквивалентно, производящей (характеристической) функции (ХФ) $Q_Z(\lambda)$ распределения вероятностей для случайного функционала-свертки с параметром λ .

$$Q_Z(\lambda) = \left\langle \exp \left(-\lambda \int_0^T x(t)x(T-t) dt \right) \right\rangle. \quad (3)$$

Здесь угловыми скобками будем обозначать усреднение в пространстве функций $\{x(t)\}$.

Поставленная задача ранее рассматривалась в работах [8-10]. В этих работах для вычисления ХФ пришлось преодолеть значительные технические трудности, в частности, найти аналитическое представление для фундаментальной матрицы $\exp(A)$, где A – некоторая построенная (4×4) -матрица.

В настоящей работе предложен и использован менее сложный подход, основанный на применении реверсных функций. Под реверсной функцией $R[\varphi(t)]$ будем понимать функцию, обладающей свойством $R[\varphi(t)] = \varphi(T-t)$, то есть свойством временной инверсии на интервале $0 \leq t \leq T$.

Вычисление характеристической функции.

Рассматривая функционал $J_2[x]$ (1) в пространстве, образованном множеством функций $\{x(t)\}$, запишем его в виде

$$\begin{aligned} J_2[x] &= \frac{1}{4} \int_0^T [(x(t) + x(T-t))^2 - \\ &\quad - (x(t) - x(T-t))^2] dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда

$$\begin{aligned} Q_Z(\lambda) &= \left\langle \exp \left\{ -\frac{1}{4} \int_0^T [x(t) + x(T-t)]^2 dt + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{4} \int_0^T [x(t) - x(T-t)]^2 dt \right\} \right\rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Введем следующие функции:

$$\begin{aligned} u(t) &= x(t) + x(T - t), \\ v(t) &= x(t) - x(T - t). \end{aligned} \quad (6)$$

Принимая во внимание явный вид функционала (1), представим его в виде интегралов от суммы квадратичных форм

$$\begin{aligned} J_2[x] &= J_U[x] + J_V[x] = \\ &= \frac{1}{4} \int_0^T [x(t) + R[x(t)]]^2 dt - \\ &\quad - \frac{1}{4} \int_0^T [x(t) - R[x(t)]]^2 dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку для функций $u(t) = x(t) + x(T - t)$ и $v(t) = x(t) - x(T - t)$ справедливо $\langle u(t) \rangle = 0$, $\langle v(t) \rangle = 0$ и $\langle u(t)v(t) \rangle = 0$, то они, с учетом нормального свойства процесса $x(t)$, статистически независимы [3]. Отсюда вытекает, что характеристическую функцию $Q_Z(\lambda)$ можно записать в виде

$$Q_Z(\lambda) = Q_U(\lambda)Q_V(\lambda), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} Q_U(\lambda) &= \left\langle \exp \left(-\frac{\lambda}{4} \int_0^T u^2(t) dt \right) \right\rangle, \\ Q_V(\lambda) &= \left\langle \exp \left(\frac{\lambda}{4} \int_0^T v^2(t) dt \right) \right\rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

В факторизационном представлении (8) для ХФ $Q_Z(\lambda)$ сначала рассмотрим первый множитель $Q_U(\lambda)$. Наряду с множеством функций $\{u(t)\}$ рассмотрим сопряженное с ним множество функций $\{p(t)\}$. Тогда

$$\begin{aligned} Q_U(\lambda) &= \left\langle \exp \left(-\frac{\lambda}{4} \int_0^T u^2(t) dt \right) \right\rangle = \left\langle \int Dp(t) \times \right. \\ &\quad \left. \times \exp \left\{ -\int_0^T p^2(t) dt + \sqrt{-\lambda} \int_0^T p(t)u(t) dt \right\} \right\rangle, \end{aligned} \quad (10)$$

где $Dp(t)$ – обобщенный дифференциал в пространстве функций $\{p(t)\}$. В силу нормальности функций $\{u(t)\}$ статистическое среднее в (10) равно

$$\begin{aligned} &\left\langle \exp \left(\sqrt{-\lambda} \int_0^T p(t)u(t) dt \right) \right\rangle = \\ &= \exp \left\{ -\frac{1}{2} \lambda \int_0^T dt p(t) \int_0^T dt' p(t') \langle u(t)u(t') \rangle \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

что после прямого вычисления коррелятора $K_U(t, t') = \langle u(t)u(t') \rangle$ дает

$$\begin{aligned} Q_U(\lambda) &= \int Dp(t) \left\langle \exp \left\{ -\int_0^T p^2(t) dt - \frac{\lambda}{2} \sigma_x^2 \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \int_0^T dt p(t) \int_0^T dt' p(t') [\exp(-\nu|t - t'|) + \right. \right. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left. \left. + \exp(-\nu|t + t' - T|) \right\} \right\rangle.$$

Функциональный интеграл (12) равен детерминанту Фредгольма

$$Q_U(\lambda) = \det(E + \lambda K_U), \quad (13)$$

где E – единичный оператор.

Утверждение 1.

Статистические средние, основанные на корреляторе $K_U(t, t') = \langle u(t)u(t') \rangle$ с собственными функциями $\{\phi_n(t)\}$ и собственными числами $\{\Lambda_n\}$, эквивалентны соответствующим статистическим средним, основанным на корреляторе $K_X(t, t') = \langle x(t)x(t') \rangle$ с собственными функциями $\{\phi_n(t)\}$ и собственными числами $\{\lambda_n\} = \{2\Lambda_n\}$.

Доказательство. Рассмотрим уравнение для собственных функций $\{\phi_n(t)\}$ оператора K_U с соответствующим им набором собственных чисел $\{\Lambda_n\}$, $n = 1, 2, \dots$,

$$\begin{aligned} \phi_n(t) &= \Lambda_n \int_0^T dt' \phi_n(t') [\exp(-\nu|t - t'|) + \\ &\quad + \exp(-\nu|t + t' - T|)]. \end{aligned} \quad (14)$$

Коррелятор $K_U(t, t')$ имеет вид

$$K_U(t, t') = \langle x(t)x(t') \rangle + \langle x(t)x(T - t') \rangle, \quad (15)$$

и выражен в (14) через корреляторы исходного случайного ОУ-процесса.

Во втором слагаемом под интегралом (14) осуществим реверсную замену во времени $T - t' = \tau$, тогда, вновь используя переменную t' , получим

$$\begin{aligned} \phi_n(t) &= \Lambda_n \int_0^T dt' [\phi_n(t') + R[\phi_n(t')]] \times \\ &\quad \times \exp(-\nu|t - t'|). \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) вытекает, что для реверсной функции справедливо

$$\begin{aligned} R[\phi_n(t)] &= \phi_n(T - t) = \\ &= \Lambda_n \int_0^T dt' [\phi_n(t') + R[\phi_n(t')]] \times \\ &\quad \times \exp(-\nu|t + t' - T|) \end{aligned} \quad (17)$$

или

$$\begin{aligned} R[\phi_n(t)] &= \Lambda_n \int_0^T dt' [\phi_n(t') + R[\phi_n(t')]] \times \\ &\quad \times \exp(-\nu|t - t'|). \end{aligned} \quad (18)$$

Складывая (16) и (18), приходим к уравнению

$$\psi_n(t) = 2\Lambda_n \int_0^T dt' \psi_n(t') \exp(-\nu|t - t'|), \quad (19)$$

где $\psi_n(t) = \phi_n(t) + R[\phi_n(t)]$. В этом уравнении ядром служит уже коррелятор только ОУ-процесса.

Из (16) и (19) можно заключить, что нахождение статистических средних, основанных на корреляторе $K_U(t, t')$ можно свести к нахождению статистических средних, основанных на корреляторе $K_X(t, t')$. Поэтому

$$Q_U(\lambda) = \left\langle \exp \left\{ -\frac{\lambda}{4} \int_0^T dt [x(t) + x(T-t)]^2 \right\} \right\rangle = \left\langle \exp \left\{ -\frac{\lambda}{2} \int_0^T x^2(t) dt \right\} \right\rangle. \quad (20)$$

В правой части этого выражения получена производящая функция $Q_Y(\lambda)$ энергетического функционала $Y = J_1[x]$ (1). Поэтому

$$Q_U(\lambda) = Q_Y(\lambda/2). \quad (21)$$

Утверждение 2.

Статистические средние, основанные на корреляторе $K_V(t, t') = \langle v(t)v(t') \rangle$ с собственными функциями $\{\Phi_n(t)\}$ и собственными числами $\{\Lambda_n\}$, эквивалентны соответствующим статистическим средним, основанным на корреляторе $K_X(t, t')$.

Доказательство. Преобразования, аналогичные выше изложенным, приводят к выражению

$$Q_V(\lambda) = \left\langle \exp \left\{ \frac{\lambda}{2} \int_0^T x^2(t) dt \right\} \right\rangle. \quad (22)$$

Поэтому

$$Q_Z(\lambda) = \left\langle \exp \left\{ -\lambda \int_0^T x(t)x(T-t) dt \right\} \right\rangle = Q_Y(\lambda/2)Q_Y(-\lambda/2). \quad (23)$$

Для полученных функциональных средних можно использовать ранее найденные аналитические представления [5]. Это окончательно дает для искомым характеристической функции

$$Q_Z(\lambda) = \left(\frac{4r_+ v e^{vT}}{(r_+ + v)^2 e^{r_+ T} - (r_+ - v)^2 e^{-r_+ T}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{4r_- v e^{vT}}{(r_- + v)^2 e^{r_- T} - (r_- - v)^2 e^{-r_- T}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

где $r_+ = \sqrt{v^2 + \lambda v \sigma_X^2}$, $r_- = \sqrt{v^2 - \lambda v \sigma_X^2}$.

Замечание. После замены в (24) $2v\sigma_X^2 \Rightarrow \sigma_W^2$ и предельного перехода $v \rightarrow 0$ в получившемся выражении приходим к характеристической функции $Q_W(\lambda) = \langle \exp(-\lambda J[w]) \rangle$ функционала-свертки $J[w] = \int_0^T dt w(t)w(T-t)$ от винеровского процесса $w(t)$ [3, 4]:

$$Q_W(\lambda) = \langle \exp(-\lambda J[w]) \rangle = \frac{1}{\text{ch}(\sqrt{\lambda} \sigma_W^2 T)}. \quad (25)$$

Свойства свертчного функционала.

Найденная характеристическая функция (24) $Q_Z(\lambda)$ функционала-свертки $Z = J_2[x]$ от нормального марковского процесса $x(t)$ содержит всю статистическую информацию о случайной величине Z . В частности, плотность распределения вероятностей $f(z)$ можно получить с помощью обратного преобразования Лапласа.

На рис. 1 приведена зависимость плотности $f(z)$ для заданных значений параметров расчета. Плотность распределения вероятностей $f(z)$ симметрична относительно линии $z = 0$. Вместе с тем она удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к плотностям распределений вероятностей интегральных квадратичных функционалов, а именно, $f(z)$ имеет единственный максимум, две точки перегиба и экспоненциальную асимптотику на перифериях.

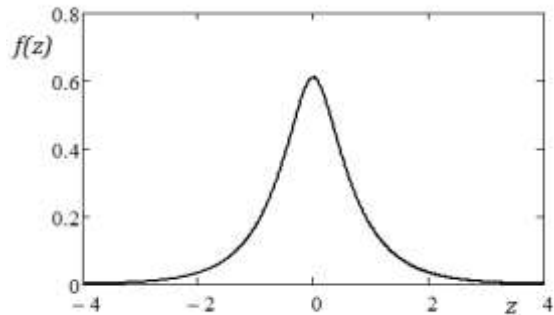


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей $f(z)$; параметры: $\sigma_X^2 = 1.0$, $T = 4.0$, $v = 1.0$

На рис. 2 приведена зависимость функции распределения $F(z)$ для этого же функционала.

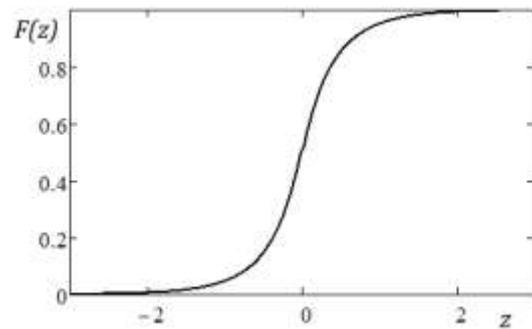


Рис. 2. Функция распределения вероятностей $F(z)$; параметры: $\sigma_X^2 = 1.0$, $T = 4.0$, $v = 1.0$

При v коэффициент корреляции влияет на поведение плотности и функции распределения функционала (1). На рис. 3–4 представлены графики плотности и функции распределения функционала (1) при изменении параметра декремента v .

С увеличением уровня корреляции (при уменьшении параметра v) график плотности распределения имеет тенденцию локализоваться вокруг среднего значения функционала (1), поэтому

плотности распределения вероятностей при уменьшении декремента становятся более пологими, как видно из рис. 3.

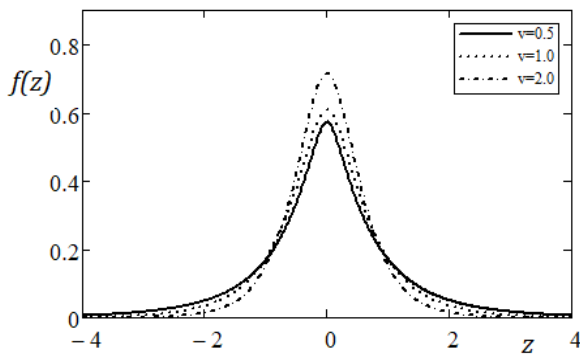


Рис. 3. Плотности распределения вероятностей $f(z)$; параметры: $\sigma_x^2 = 1.0$, $T = 4.0$, $\nu = 0.5, 1.0, 2.0$

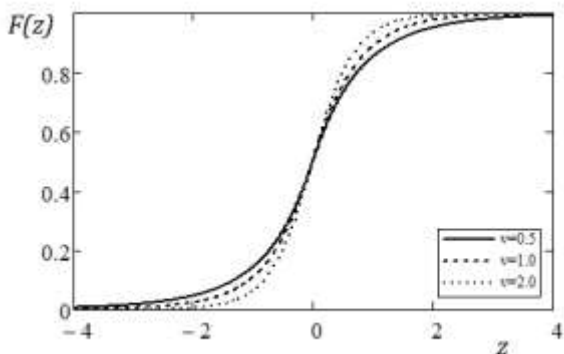


Рис. 4. Функции распределения вероятностей $F(z)$; параметры: $\sigma_x^2 = 1.0$, $T = 4.0$, $\nu = 0.5, 1.0, 2.0$

Также следует, что уменьшение параметра $\chi = \nu T$, равного отношению интервала наблюдения T к длине корреляции $l_{corr} = \nu^{-1}$ ОУ-процесса, приводит к локализации значений функционала-свертки во флуктуационную область $z \approx 0$.

Из аналогичных расчетов, можно показать, что увеличение параметра $T\sigma_x^2$ приводит к расширению значений функционала-свертки в периферийные области больших уклонений. На рис. 5–6 приведены плотности и функции распределения для заданного квадратичного функционала при изменении параметра интенсивности σ .

Из рис. 1–6 можно сделать вывод о том, что приведенные зависимости отвечают общим закономерностям, характерным для плотности и функции распределения.

Из (24) следует для первого момента, что

$$M[Z] = 0. \quad (25)$$

далее, дисперсия равна

$$M[Z^2] = \sigma_x^4 T^2 \frac{\chi - 1 + \exp(-\chi)}{\chi^2}, \quad \chi = \nu T. \quad (26)$$

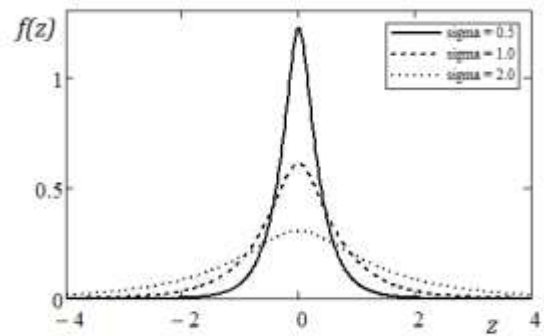


Рис. 5. Плотности распределения вероятностей $f(z)$; параметры: $\sigma_x^2 = 0.5, 1.0, 2.0$, $T = 4.0$, $\nu = 1.0$

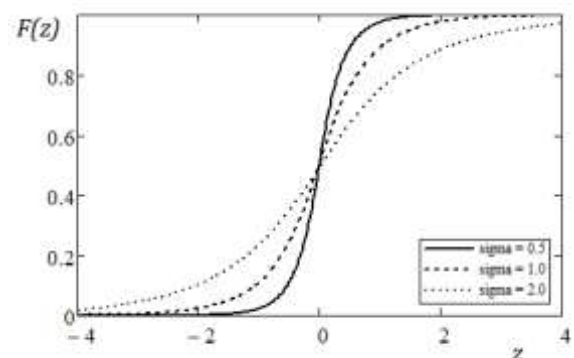


Рис. 6. Функции распределения вероятностей $F(z)$; параметры: $\sigma_x^2 = 0.5, 1.0, 2.0$, $T = 4.0$, $\nu = 1.0$

На рис. 7 показана зависимость среднеквадратического разброса σ плотности $f(z)$ случайных значений функционала-свертки Z .

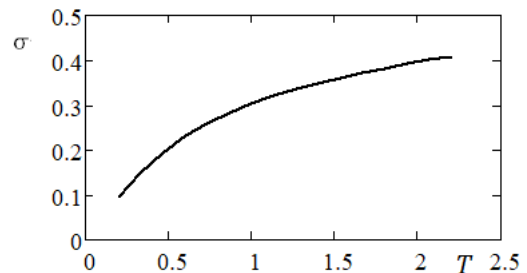


Рис. 7. Зависимость среднеквадратического разброса σ плотности $f(z)$ от длительности наблюдения T ; параметры: $\sigma_x^2 = 1$, $\nu = 1$

Из рис. 7 можно сделать вывод, что при увеличении интервала наблюдения среднеквадратический разброс плотности также возрастает.

На рис. 8 показана зависимость параметра интенсивности $\sigma = \sqrt{M[Z^2]}$ (26) плотности $f(z)$ случайных значений функционала-свертки Z .

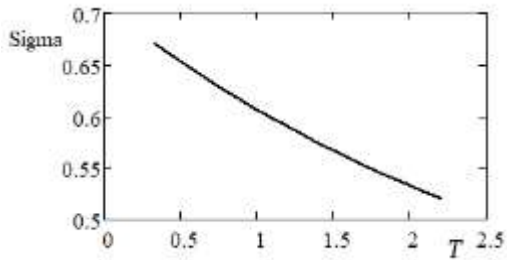


Рис. 8. Зависимость параметра интенсивности σ от длительности наблюдения T ; параметр: $\nu = 1$

Выводы. В работе рассмотрен случайный процесс Орнштейна-Уленбека, обладающий свойствами стационарности, нормальности и марковости. Для заданного временного интервала изучены энергетический функционал и функционал сверточного типа. Предложен подход, основанный на применении реверсных функций, что дало возможность получения аналитического выражения для производящей функции распределения случайных значений функционала-свертки.

Плотность и интегральный закон распределения получены численно для выбранных значениях времени наблюдения T , декремента случайного процесса ν и его интенсивности σ_X^2 . Получено, что увеличение параметра $T\sigma_X^2$ приводит к расширению значений функционала-свертки в периферийные области больших уклонений. Уменьшение параметра νT приводит к локализации значений функционала-свертки во флуктуационной области $z \approx 0$. Плотность $f(z)$ симметрична относительно линии $z = 0$ и удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к плотностям распределений вероятностей интегральных квадратичных функционалов.

Список литературы

1. Uhlenbeck G. E., Ornstein L. S. *On the theory of Brownian Motion*. Phys. Rev. 1930. V. 36. P. 823–841.
2. Чандрасекар С. *Стохастические проблемы в физике и астрономии*. Москва: Гос. издательство иностранной литературы. 1947. 168 с.
3. Тихонов В. И., Миронов М. А. *Марковские процессы*. Москва: Сов. Радио. 1977. 488 с.
4. Habibi A. *Two-Dimensional Bayesian Estimate of Image*. Proc. IEEE, 1972. V. 60. № 7. P. 878–883.
5. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. *Шероховатость поверхностей*. Москва: Наука. 1975. 344 с.
6. Клячко А. А., Солодяников Ю. В. Вычисление характеристических функций некоторых функционалов от винеровского процесса и броуновского моста. *Теория вероятн. и ее применение*. 1986. Т. 31. Вып. 3. С. 569–573.
7. Лэкс М. *Флуктуации и когерентные явления*. Москва: Наука. 1974. 299 с.

8. Мазманишвили А. С. *Континуальное интегрирование как метод решения физических задач*. Киев: Наукова Думка. 1987. 224 с.
9. Вирченко Ю. П., Мазманишвили А. С. Статистические свойства функционала-свертки от нормального марковского процесса. *Доклады Академии Наук УССР*. 1988. № 1. С. 14–16.
10. Вирченко Ю. П., Мазманишвили А. С. Распределение вероятностей случайного функционала-свертки от нормального марковского процесса. *Проблемы передачи информации*. 1990. Т. 26. Вып. 3. С. 96–101.
11. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Наука. 2004. 356 с.
12. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике*. Москва: Наука. 1981. 719 с.
13. Задирака В. К. *Теория вычисления преобразования Фурье*. Киев: Наукова Думка. 1983. 216 с.

References (transliterated)

1. Uhlenbeck G. E., Ornstein L. S. On the theory of the Brownian Motion. *Phys. Rev.*, 1930, v. 36, pp. 823–841.
2. Chandrasekar S. *Stokhasticheskie problemy v fizike i astronomiji* [Stochastic problems in physics and astronomy]. Moscow, GIL Publ., 1947. 168 p.
3. Tihonov V. I., Mironov M. A. *Markovskie processy* [Process of Markov]. Moscow, Sov., Radio Publ., 1977. 488 p.
4. Habibi A. Two-Dimensional Bayesian Estimate of Image. *Proc. IEEE*, 1972, vol. 60, no. 7, pp. 878–883.
5. Husu A. P., Vitenberg Yu. R., ed. *Sheroховатост' poverhnosti* [Surface of roughness]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 344 p.
6. Klyachko A. A., Solodyannikov Yu. V. Vychislenie harakteristicheskikh funkciy nekotorykh funkcionalov ot vinnerovskogo processa [The calculation of the characteristic functions of some functionals of the Wiener process]. *Teoriya veroyatnostey i primeneniye* [Probability theory and its application]. 1986, vol. 31, issue 3, pp. 569–573.
7. Lax M. *Fluktuaciya i kogerentnyye yavleniya* [Fluctuations and coherent phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 299 p.
8. Mazmanishvili O. S. *Kontinual'noe integrirovaniye kak metod resheniya fizicheskikh zadach* [Continual integration as a method for solving physical problem]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1987. 224 p.
9. Vyrchenko Yu. P., Mazmanishvili O. S. Statisticheskie svoystva funkcionala-svertki ot normalnogo markovskogo processa [Statistical properties of convolutional functional from a normal Markov process]. *Doklady Akademii Nauk USSR*. 1988, issue 1, pp. 14–16.
10. Vyrchenko Yu. P., Mazmanishvili O. S. Raspredeleniye veroyatnostey sluchaynogo funkcionala funkcionala-svertki ot normalnogo markovskogo processa [Probability distribution of a convolutional functional from a normal Markov process]. *Problemy peredachi informacii*, 1990, issue 26, no. 3, pp. 96–101.
11. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funkciy i funkcional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 356 p.
12. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike* [Math Handbook]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 719 p.
13. Zadiraka V. K. *Teoriya vychisleniya preobrazovaniya Fur'e* [Fourier Transform Computation Theory]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1983. 216 p.

Поступила (received) 05.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мазманішвілі Олександр Сергійович (Мазманишвили Александр Сергеевич, Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych) – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: mazmanishvili@gmail.com

Сидоренко Ганна Юрїївна (Сидоренко Анна Юрьевна, Sydorenko Ganna Yuriiivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: annsydorenko01@gmail.com

Т. Д. ГУЦОЛ

ВЛИЯНИЕ НА ПУЛЬСИРУЮЩИЙ КРОВОТОК ЖИВОТНЫХ СОБСТВЕННЫХ И ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Рассмотрена теоретическая модель кровотока в крупных кровеносных сосудах животных, которая учитывает воздействие электромагнитных полей на форменные элементы крови, как созданных самим кровотоком, так и существующих в окружающей среде. Кровеносные сосуды представлены в виде однородных цилиндрических каналов с жесткими стенками, а кровь – в виде ньютоновской жидкости. Решение уравнения Навье-Стокса проведено в предположении, что пульсации давления имеют форму прямоугольных импульсов. Для учета дополнительного воздействия на кровоток внешнего электромагнитного поля в уравнение добавлено слабое, которое описывает его влияние на заряд и ток крови. Показано, что основной вклад в это воздействие оказывает магнитная составляющая поля. Исследован характер поведения появляющейся в этом случае радиальной составляющей скорости кровотока, а также изменение его продольной составляющей. Показано, что радиальная составляющая скорости имеет комплексную амплитуду. Приближение частоты падающего электромагнитного поля к частоте пульсаций давления приводит к резкому увеличению радиальной составляющей и возможному оседанию форменных элементов крови на стенках сосуда. Одновременно с появлением радиальной составляющей крови меняется и продольная составляющая. Численный анализ зависимости продольной и радиальной составляющей кровотока показал их существенную зависимость от частоты внешнего электромагнитного поля, которая имеет резонансный характер. Возрастание скоростей наступало на частотах равных частоте пульсаций кровотока или ее гармоник. Одновременно возникает предположение о том, что такой же эффект можно ожидать, если на кровь будет воздействовать сверхвысокочастотное поле, модулированное сверхнизкими частотами, что возможно, учитывая способность крови в сосудах осуществлять функцию детектирования.

Ключевые слова: кровоток, внешние электромагнитные поля, уравнение Навье-Стокса, пульсация крови, составляющие скорости, резонансные явления.

Т. Д. ГУЦОЛ

ВПЛИВ НА ПУЛЬСУЮЧУ ТЕЧІЮ КРОВІ ТВАРИН ВЛАСНИХ І ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Розглянута теоретична модель кровотоку у великих кровеносних судинах тварин, яка враховує вплив електромагнітних полів на форменні елементи крові, як створених самим кровотоком, так і існуючих у навколишньому середовищі. Кровеносні судини представлені у вигляді однорідних циліндричних каналів з жорсткими стінками, а кров – у вигляді ньютонівської рідини. Рішення рівняння Нав'є-Стокса проведено в припущенні, що пульсації тиску мають форму прямокутних імпульсів. Для обліку додаткового впливу на кровотік зовнішнього електромагнітного поля в рівняння додано доданок, який описує його вплив на заряд і струм крові. Показано, що основний внесок в цей вплив робить магнітна складова поля. Досліджено характер поведінки радіальної складової швидкості кровотоку, що з'являється в цьому випадку, а також зміна його поздовжньої складової. Показано, що радіальна складова швидкості має комплексну амплітуду. Наближення частоти падаючого електромагнітного поля до частоти пульсацій тиску призводить до різкого збільшення радіальної складової і можливого осідання формених елементів крові на стінках судин. Одночасно з появою радіальної складової крові змінюється і поздовжня складова. Чисельний аналіз залежності поздовжньої і радіальної складової кровотоку показав їх суттєву залежність від частоти зовнішнього електромагнітного поля, яка має резонансний характер. Зростання швидкостей наступало на частотах рівних частоті пульсацій кровотоку або її гармонік. Одночасно виникає припущення про те, що такий же ефект можна очікувати, якщо на кров буде впливати надвисокочастотне поле, модульоване наднизькими частотами, що можливо, з огляду на здатність крові в судинах здійснювати функцію детектування. Це досить правдоподібно, оскільки мембранні структури клітин, в тому числі і клітин еритроцитів, володіють такими властивостями.

Ключові слова: течія крові, зовнішні електромагнітні поля, рівняння Нав'є-Стокса, пульсація крові, складові швидкості, резонансні явища

T. D. HUTSOL

INFLUENCE ON PULSING BLOOD OF ANIMALS BY OWN AND EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELDS

A theoretical model of blood flow in large blood vessels of animals is considered, which takes into account the effect of electromagnetic fields on the formed elements of the blood, both those created by the bloodstream itself and those existing in the environment. Blood vessels are presented in the form of uniform cylindrical channels with rigid walls, and blood – in the form of Newtonian fluid. The solution of the Navier-Stokes equation is carried out under the assumption that the pressure pulsations have the shape of rectangular pulses. To account for the additional effects on the blood flow of an external electromagnetic field, a term was added to the equation that describes its effect on the charge and flow of blood. It is shown that the main contribution to this effect is made by the magnetic component of the field. The nature of the behavior of the radial component of the blood flow velocity appearing in this case, as well as the change of its longitudinal component, is investigated. It is shown that the radial component of velocity has a complex amplitude. The approximation of the frequency of the incident electromagnetic field to the frequency of pressure pulsations leads to a sharp increase in the radial component and the possible sedimentation of blood corpuscles on the vessel walls. Simultaneously with the appearance of the radial component of the blood, the longitudinal component also changes. Numerical analysis of the dependence of the longitudinal and radial components of the blood flow showed their substantial dependence on the frequency of the external electromagnetic field, which has a resonant character. The increase in velocity occurred at frequencies equal to the frequency of the pulsations of the blood flow or its harmonics. At the same time, there is an assumption that the same effect can be expected if the blood is affected by a microwave field modulated by ultra-low frequencies, which is possible, given the ability of blood in the vessels to perform the detection function.

Keywords: blood flow, external electromagnetic fields, Navier–Stokes equation, blood pulsation, velocity components, resonance phenomena.)

Введение. Одним из существенных вопросов при изучении физиологического портрета человека и животного являются вопросы динамики крови. Это по- служило причиной появления достаточного количества работ, посвященных данной проблеме. Однако многие из них ограничиваются рассмотрением лишь

© Т. Д. Гуцол, 2018

стационарного случая. Это значительно сужает применение полученных результатов для оценки явлений, связанных с воздействием на кровотоки внешних периодически изменяющихся факторов, таких, как электромагнитные поля.

Постановка задачи. Рассмотрим однородный цилиндрический канал с жесткими стенками радиуса R и длины L . Канал заполнен кровью, которую мы будем рассматривать как ньютоновскую жидкость [1–3]. На входе канала действует периодический источник давления. В этом случае движение ньютоновской жидкости может быть описано с помощью уравнения Навье–Стокса [4–6]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

где \mathbf{v} – скорость кровотока;
 P – приложенное на входе канала давление;
 ρ – плотность крови;
 η – вязкость крови.

Уравнение (1) является нелинейным, однако тот факт, что движение крови в сосудах является ламинарным, дает возможность линеаризировать задачу. Кроме того, ламинарность потока приводит к тому, что скорость \mathbf{v} имеет лишь одну компоненту v_z .

С учетом сказанного выше, а также принимая во внимание осесимметричность задачи ($\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$), получим уравнение для v_z в цилиндрической системе координат в виде:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} - \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}, \quad (2)$$

где ΔP – перепад давления в кровотоке между концом и началом кровеносного сосуда заданной длины L ;

ν – кинематическая вязкость, равная η/ρ .

По своему характеру выражение (2) является неоднородным дифференциальным уравнением с однородными начальными и граничными условиями:

$$v_z(r, 0) = 0; \quad v_z(R, t) = 0. \quad (3)$$

Правая часть уравнения (2) содержит величину ΔP , представляющую собой перепад давления ΔP_0 в кровеносном сосуде и имеющую импульсный характер.

Обозначим длительность импульсов t_2 и период повторения – t_1 . Тогда

$$\frac{t_2}{t_1} = \theta.$$

Методы исследования. Для решения уравнения (2) разложим функцию $\Delta P(t)$ в ряд Фурье по косинусам и воспользуемся методом разделения переменных. Для этого положим

$$v_z = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(r) T_n(t). \quad (4)$$

С учетом вышесказанного, выражение для про-

дольной составляющей скорости кровотока v_z имеет вид:

$$v_z = \frac{2\pi \Delta P_0}{\rho L} \frac{J_0(\alpha_1^{(0)} r)}{\mu_1^{(0)} J_1(\mu_1^{(0)})} \left\{ \frac{\theta}{v(\alpha_1^{(0)})^2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{\sin k\pi\theta}{k} \frac{\frac{1}{kl} \sin klt + \left(\frac{1}{kl}\right)^2 v(\alpha_1^{(0)})^2 \cos klt}{1 + \left[\frac{v(\alpha_1^{(0)})^2}{kl}\right]^2} \right\}. \quad (5)$$

Здесь J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода;

$$\alpha_1^{(0)} = \frac{\mu_1^{(0)}}{R};$$

$\mu_1^{(0)} = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\nu}} R$ – корень функции Бесселя нулевого порядка;

λ_1 – собственное значение уравнения, определяющего $R_n(r)$;

$$l = \frac{2\pi}{t_1}.$$

Поскольку рассматривалось решение при $t \rightarrow \infty$, то переходные процессы в расчет не принимались. Вычисление $T_n(t)$ дает быстро сходящиеся ряды, поэтому для описания процессов, происходящих при движении крови, можно ограничиться первыми двумя-тремя гармониками разложения $\Delta P(t)$. Что касается разложения по собственным функциям, то здесь достаточно взять $n = 1$. При $n > 1$ непосредственная подстановка корней функции Бесселя нулевого порядка и наиболее характерных размеров кровеносных сосудов в выражение для $T_n(t)$ показывает пренебрежимо малость $T_2(t)$, $T_3(t)$ и т.д. по сравнению с $T_1(t)$.

Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует движению крови при постоянном давлении на входе кровеносного сосуда. Второе слагаемое дает поправку, связанную с пульсацией крови. Его появление означает, что профиль скоростей кровотока будет совершать периодические колебания около среднего значения с некоторой частотой.

Полученный результат указывает на возможность возникновения в пульсирующем кровотоке явлений резонансного характера. Они могут возникнуть, в частности, под влиянием силы соответствующей частоты, вызванной внешним электромагнитным полем, промодулированным с частотой пульсации давления. Одним из следствий этого будет увеличение скорости кровотока и возможность столкновения форменных элементов крови, несущих электрический заряд.

Вместе с тем, анализ выражения для v_z дает возможность связать значение этой величины с величиной диаметра сосуда. Так, в сосудах с малым сечением, колебания скорости будут определяться слагаемым с $\cos klt$, а в сосудах с большим поперечным сечением – с $\sin klt$.

Рассмотрим теперь кровоток под воздействием внешнего электромагнитного поля, которое характеризуется частотой ω и амплитудами векторов \mathbf{E}_0 и \mathbf{H}_0 . В этом случае уравнение Навье–Стокса приобретает несколько иной вид [7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \mathbf{f} + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \mathbf{v}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ξ – второй коэффициент вязкости.

Сила \mathbf{f} выражает действие электромагнитного поля на связанные со средой заряд, ток и равна

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} + \mu_0 [\mathbf{J}, \mathbf{H}], \quad (7)$$

где ρ_e – объемная плотность заряда;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м;

\mathbf{J} – плотность тока.

Считая, как и выше, кровь несжимаемой жидкостью, а ее течение ламинарным, а также то, что основное воздействие на кровь будет оказывать внешнее магнитное поле, преобразуем (6) к виду:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \nu \nabla^2 \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu_0}{\rho} [\mathbf{J}, \mathbf{H}], \quad (8)$$

где $\mathbf{J} = eNv_0$ – плотность тока эритроцитов;

e – заряд одиночного эритроцита;

N – количество эритроцитов в единице объема;

v_0 – скорость кровотока без внешнего поля.

Уравнение (8) может быть представлено в виде трех скалярных уравнений, описывающих радиальную, азимутальную и продольную составляющие скорости. Интерес представляют радиальная и продольная составляющие. Таким образом, задача сводится к решению двух уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} - \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] = \\ = \frac{eN\mu_0}{\rho} v_{0z} [\vec{e}_z^0, \mathbf{H}]_r; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} - \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] = \\ = \frac{eN\mu_0}{\rho} v_{0z} [\vec{e}_z^0, \mathbf{H}]_z + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}. \end{aligned} \quad (10)$$

Определим радиальную составляющую скорости. При решении задачи необходимо рассмотреть два случая: вектор \mathbf{H} направлен вдоль оси сосуда, и случай, когда вектор \mathbf{H} направлен перпендикулярно этой оси. Линейная комбинация этих двух случаев даст возможность рассмотреть произвольную ориентацию вектора магнитного поля.

Если имеется лишь продольная составляющая вектора \mathbf{H} то правая часть уравнения (9) равна нулю. Оно описывает при этом возможные собственные

колебания системы в поперечном сечении сосуда, вызванные стохастическими процессами. Однако наличие вязкости в крови приведет к быстрому затуханию таких колебаний.

Рассмотрим случай поперечного вектора \mathbf{H} :

$$\mathbf{H} = H_r \mathbf{e}_r^0 + H_\varphi \mathbf{e}_\varphi^0 \quad (11)$$

В предположении однородности магнитного поля вдоль оси сосуда, решение уравнения (9) имеет вид:

$$\begin{aligned} v_r = -\frac{2eN\mu_0 H_{0\varphi} \Delta P_0}{\rho^2 L \mu_1^{(0)} J_1(\mu_1^{(0)})} \times \\ \times \left\{ \frac{\theta}{v(\alpha_1^{(0)})^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]} + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{\sin k\pi\theta}{k \left[1 + \frac{v(\alpha_1^{(0)})^2}{kl} \right]^2} \times \right. \\ \times \left[\frac{1 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega] \sin klt - kl \cos klt}{[v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]^2 + k^2 l^2} + \right. \\ \left. \left. + \frac{v(\alpha_1^{(0)})^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega] \cos klt + kl \sin klt}{k^2 l^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]^2 + k^2 l^2} \right] \right\} \\ \times J_0(\alpha_1^{(0)} r) e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $H_{0\varphi}$ – амплитуда азимутальной составляющей магнитного поля.

Как видно из (12), радиальная составляющая скорости имеет комплексную амплитуду. Ее действительная часть определяется амплитудой и частотой пульсаций давления в кровотоке при отсутствии внешнего электромагнитного поля, мнимая часть – действием на кровоток внешнего ЭМП с частотой ω .

Результаты моделирования. Анализ полученного выражения показывает, что величина $v_r(t)$ будет незначительна при достаточно больших частотах ω . Однако приближение частоты падающего электромагнитного поля к частоте пульсаций кровотока или к одной из ее гармоник должно приводить к резкому увеличению амплитуды v_r , то есть к резонансным явлениям. Это может в свою очередь резко увеличить возможность образования тромбов и других нежелательных явлений. Уменьшение частоты до нуля вновь сделает v_r незначительной и равной постоянной величине.

Оценим теперь влияние продольного и поперечного вектора \mathbf{H} на продольную составляющую скорости кровотока. Для этого решим уравнение (10). Воспользовавшись условием равенства дивергенции нулю, приходим к выражению:

$$v_z = -\frac{2eN\mu_0 H_{0\varphi} \Delta P_0 z}{\rho^2 LR J_1(\mu_1^{(0)})} \times \left\{ \frac{\theta}{v(\alpha_1^{(0)})^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{\sin k\pi\theta}{k \left[1 + \frac{v(\alpha_1^{(0)})^2}{kl} \right]^2} \times \left[\frac{1}{kl} \frac{[v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega] \sin klt - kl \cos klt}{[v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]^2 + k^2 l^2} + \frac{v(\alpha_1^{(0)})^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega] \cos klt + kl \sin klt}{k^2 l^2 [v(\alpha_1^{(0)})^2 + i\omega]^2 + k^2 l^2} \right] \right\} \times J_1(\alpha_1^{(0)} r) e^{i\omega t}, \quad (13)$$

где v_z меняется в пределах длины L данного сосуда.

Таким образом, после появления внешнего электромагнитного поля, вектор \mathbf{H} которого направлен перпендикулярно оси сосуда, в продольной составляющей скорости появляется добавка, определяемая выражением (13).

Выводы. Анализ зависимости v_z и v_r от частоты внешнего электромагнитного поля показал их резонансный характер. Возрастание скоростей наступало на частотах равных частоте пульсаций кровотока или ее гармоник. Одновременно возникает предположение о том, что такой же эффект можно ожидать, если на кровь будет воздействовать СВЧ поле, модулированное сверхнизкими частотами, что возможно при способности крови в сосудах осуществлять функцию детектирования [9–12].

Список литературы

1. Бейер В. А. *Краткое пособие по гематологии*. Ленинград: Медицина, 1973. 231 с.
2. Волкова С. А., Боровков Н. Н. *Основы клинической гематологии: учебное пособие*. Нижний Новгород: Нижегородская государственная медицинская академия, 2013. 400 с.
3. *Гемостаз. Физиологические механизмы, принципы диагностики основных форм геморрагических заболеваний* / ред. Петрищева Н. Н., Папаян Л. П. Санкт-Петербург:

4. Государственный медицинский ун-т им. акад. И. П. Павлова, 1999. 104 с.
4. Бэтчеллер Дж. *Введение в динамику жидкостей*. Москва: Мир, 1973. 757 с.
5. Смайлов С. А., Кувшинов К. А. *Механика жидкости и газа: учебное пособие*. Томск: Томский политехн. ун-т, 2012. 12 с.
6. Жуков Н. П. *Гидрогазодинамика: учебное пособие*. Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. 92 с.
7. Куликовски А. Г., Любимов Г. А. *Магнитная гидродинамика*. Москва: ФизматГИЗ, 1962. 150 с.
8. Брановер Г. Г., Цинобер А. Б. *Магнитная гидродинамика несжимаемых сред*. Москва: Наука, 1970. 379 с.
9. *Biological effects of electromagnetic fields*. Stockholm: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 1976. 110 p.
10. Огурцов А. Н., Близнюк О. Н. *Биоэлектромагнетизм: учебное пособие*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 256 с.
11. Неведов А. И. Внутреннее электромагнитное поле человека и Биоэлектромагнетизм: монография. Москва: Русайнс, 2017. 184 с.
12. Бинги В. Н. *Магнитобиология: эксперименты и модели*. Москва: МИЛТА, 2002. 592 с.

References (transliterated)

1. Bejer V. A. *Kratkoe posobie po gematologii* [Short Hematology Tutorial]. Leningrad, Medicina Publ., 1973. 231 p.
2. Volkova S. A., Borovkov N. N. *Osnovy klinicheskoy gematologii: uchebnoe posobie* [Basics of Clinical Hematology: study guide] Nizhny Novgorod, Nizhegorodskaja gosudarstvennaja medicinskaja akademija Publ., 2013. 400 p.
3. Petrishheva N. N., Papajan L. P. *Gemostaz. Fiziologicheskije mehanizmy, principy diagnostiki osnovnyh form gemorragicheskijh zabolovanij* [Hemostasis. Physiological mechanisms, principles of diagnosis of the main forms of hemorrhagic diseases]. St. Petersburg, Gosudarstvennyj medicinskij univ. im. akad. I. P. Pavlova Publ., 1999. 104 p.
4. Bjetcheller Dzh. *Vvedenie v dinamiku zhidkostej* [Introduction to Fluid Dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1973. 757 p.
5. Smajlov S. A., Kuvshinov K. A. *Mehanika zhidkosti i gaza: uchebnoe posobie* [Fluid and gas mechanics: study guide]. Tomsk: Tomskij politehn. univ. Publ., 2012. 12 p.
6. Zhukov N. P. *Gidrogazodinamika: uchebnoe posobie* [Fluid Dynamics: study guide]. Tambov: FGBOU VPO «TGTU» Publ., 2011. 92 p.
7. Kulikovski A. G., Ljubimov G. A. *Magnitnaja gidrodinamika* [Magnetic Fluid Dynamics]. Moscow: FizmatGIZ Publ., 1962. 150 p.
8. Branover G. G., Cinober A. B. *Magnitnaja gidrodinamika neszhimaemyh sred* [Magnetic hydrodynamics of incompressible media]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 379 p.
9. *Biological effects of electromagnetic fields*. Stockholm: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, 1976. 110 p.
10. Ogurcov A. N., Bliznjuk O. N. *Biojelektromagnetizm: uchebnoe posobie* [Bioelectromagnetism: study guide]. Kharkov: NTU «KhPI» Publ., 2015. 256 p.
11. Nefedov A. I. *Vnutrennee jelektromagnitnoe pole cheloveka i Biojelektromagnetizm: monografija* [Human internal electromagnetic field and bioelectromagnetism: monograph]. Moscow: Rusajns Publ., 2017. 184 p.
12. Bingi V. N. *Magnitobiologija: jeksperimenty i modeli* [Magnetobiology: experiments and models]. Moscow: MILTA Publ., 2002. 592 p.

Поступила (received) 12.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гуцол Тарас Дмитрович (Guцol Taras Dmitrievich, Hutsol Taras Dmitrovich) – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної і виховної роботи Подільського державного аграрно-технічного університету; м. Кам'янець-Подільський, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3672>; e-mail: pro-gp@pdatu.edu.ua

T. N. LISETSKY

EFFICIENCY RESEARCH OF THE THREE-LEVEL MODEL OF SMALL-SERIES PRODUCTION PLANNING

We consider the problem of finding an order portfolio that maximizes the total profit according to one of five optimization criteria and should fit the beginning date of the planned period and the due dates specified by the customers. Also, we need to build for this order portfolio a feasible (not violating the due dates) operational plan of jobs processing that would correspond to the minimum possible processing time of the entire order portfolio. We show that the problem in this formulation is a multi-stage scheduling problem. We describe previously developed methodology for the problem solving: the three-level model of production planning. We substantiate the possibility of applying the methodology for any type of small-series production according to one of the five criteria of optimality. We show that independently of the production type considered, whatever is the original production technology, and no matter how the multi-stage scheduling problem is implemented, we reduce the planning problem solving for any of the five optimality criteria to obtaining a feasible solution of the multi-stage scheduling problem for the criterion of maximizing the start time of the earliest job. We show that the efficiency of the multi-stage scheduling problem solving depends on the efficiency of solving the first level of the three-level model. Therefore, we statistically investigate and prove the efficiency of solving the problem of minimizing the total weighted completion time of jobs with precedence relations on a single machine. We show the efficiency of PSC-algorithm for the problem solving for the case when the weights of only terminal vertices of the precedence graph are non-zero. We have shown that the approximation algorithm for this problem solving allows to solve real practical large size problems (we checked dimensions of up to 10,000 jobs). The solutions obtained by the approximation algorithm coincided with those obtained by the exact PSC-algorithm in 99.97 % cases.

Keywords: production planning, PSC-algorithm, exact algorithm, approximation algorithm, combinatorial optimization, scheduling

T. M. ЛИСЕЦЬКИЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРИРІВНЕВОЇ МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розглядається задача знаходження портфеля замовлень, який максимізує сумарний прибуток за одним з п'яти критеріїв оптимізації та при якому дотримано початок планового періоду і директивні строки, задані замовниками. Також потрібно побудувати для цього портфеля замовлень допустимий (що не порушує директивних строків) поопераційний план виконання робіт, якому відповідав би мінімально можливий час виконання всього портфеля замовлень. Показано, що задача в такій постановці є багатоступінною задачею календарного планування. Описується раніше розроблена методологія розв'язання задачі – трирівнева модель планування виробництва. Обґрунтовується можливість застосування методології для будь-якого виду дрібносерійного виробництва за одним з даних п'яти критеріїв оптимальності. Показано, що для будь-якого виду виробництва, при будь-якій вихідній технології виконання виробів і при будь-якій реалізації багатоступінної задачі календарного планування, розв'язання задачі календарного планування за критерієм максимізації моменту запуску найбільш ранньої роботи. Показано, що ефективність розв'язання багатоступінної задачі календарного планування залежить від ефективності розв'язання першого рівня трирівневої моделі. Тому, статистично досліджується і обґрунтовується ефективність розв'язання задачі мінімізації сумарного зваженого моменту закінчення виконання робіт з відносинами передування на одному приладі. Показана ефективність ПДС-алгоритму розв'язання задачі для випадку, коли ваги всіх вершин графа передування, крім кінцевих, дорівнюють нулю. Показано, що наближений алгоритм розв'язання цієї задачі дозволяє розв'язувати реальні практичні задачі великої розмірності (перевірялися розмірності до 10,000 робіт). Розв'язки, отримані наближеним алгоритмом, збіглися з отриманими точним ПДС-алгоритмом в 99.97 % випадків.

Ключові слова: планування виробництва, ПДС-алгоритм, точний алгоритм, наближений алгоритм, комбінаторна оптимізація, складання розкладів

T. N. LISETSKY

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается задача нахождения портфеля заказов, максимизирующего суммарную прибыль по одному из пяти критериев оптимизации, при котором соблюдено начало планового периода и директивные сроки, заданные заказчиками. Также требуется построить для этого портфеля заказов допустимый (не нарушающий директивных сроков) пооперационный план выполнения работ, которому соответствует минимально возможное время выполнения всего портфеля заказов. Показано, что задача в такой постановке является многоэтапной задачей календарного планирования. Описывается ранее разработанная методология решения задачи – трехуровневая модель планирования производства. Обосновывается возможность применения методологии для любого вида мелкосерийного производства по любому из данных пяти критериев оптимальности. Показано, что для любого вида производства, при любой исходной технологии выполнения изделий и при любой реализации многоэтапной задачи календарного планирования, решение задачи планирования по любому из пяти этих критериев оптимальности сводится к получению допустимого решения многоэтапной задачи календарного планирования по критерию максимизации момента запуска самой ранней работы. Показано, что эффективность решения многоэтапной задачи календарного планирования зависит от эффективности решения первого уровня трехуровневой модели. Поэтому, статистически исследуется и обосновывается эффективность решения задачи минимизации суммарного взвешенного момента окончания выполнения работ с отношениями предшествования на одном приборе. Показана эффективность ПДС-алгоритма решения задачи для случая, когда веса всех вершин графа предшествования, кроме конечных, равны нулю. Показано, что приближенный алгоритм решения этой задачи позволяет решать реальные практические задачи большой размерности (проверялись размерности до 10,000 работ). Решения, полученные приближенным алгоритмом, совпали с полученными точным ПДС-алгоритмом в 99.97 % случаев.

Ключевые слова: планирование производства, ПДС-алгоритм, точный алгоритм, приближенный алгоритм, комбинаторная оптимизация, составление расписаний

Introduction. Production planning in the current conditions of tough market competition is a complex task that requires consideration of a real technological process' complexity, on the one hand, and the implementation of

sophisticated optimization algorithms, on the other hand. Due to the task's complexity, problems of production plan optimization occupy the minds of scientists for about 70 years. Economic and production criteria which became important relate to [1]: profit maximization, costs minimization, orders fulfillment just in time, energy resources saving through the efficient equipment usage, the maximum shortening in the production cycle of products.

According to the principle of hierarchical planning [2–6] which represents a philosophy to address complex problems for a wide variety of systems, authors of [7–9] have proposed a three-level planning model for small-series productions. It was aimed to solve the problem of building a coordinated schedule of jobs processing by a set of enterprise resources. The functional diagram of the model is presented in [8]. Also, they develop a system of interrelated models and methods which allow to take into account the complexity of a modern production and to obtain close to optimal solutions to the planning problem, due to the global optimum search strategy. The first level of the model is based on solving the problem of the total weighted completion time of tasks minimization (TWCT) for the case when only terminal vertices of the precedence relations graph have a non-zero weight coefficient (TWCTZ problem). The TWCTZ problem solution determines the tasks priorities and minimizes the time they pass through the production cycle.

The proposed models and methods are universal in nature and can be implemented for planning in organizational or production systems in various sectors of a national economy, in particular [1, 7], for planning of discrete type production, building industry, project management. The developed models and methods of hierarchical planning can also be applied in computer-aided design systems, information control systems, scientific research automation systems, etc.

The purpose of this article is to substantiate the efficiency of using the methodology developed in [7] to obtain an operational plan for arbitrary objects with a network representation of technological processes. We show that the efficiency of the problem solving is determined by the efficiency of solving TWCTZ problem. Then, we carry out the efficiency study of its solving algorithms.

The Problem Statement. Suppose that we have an order portfolio [7–9] which is a set of n packages of interrelated jobs $J = (J_1, J_2, \dots, J_n)$. We call a package J_i , $i = \overline{1, n}$, a product (under a product we may also mean the entire series of uniform products). Customer specifies for each product the technology of its production and the desired optimization criterion (one of the five basic criteria listed below), as well as the beginning date for the planning period. Also, the customer sets the due dates d_i for all products in accordance with their optimization criteria, except for the case of optimization according to the first basic criterion. On each subset J_i , a partial order is given by an oriented acyclic graph. The partial ordering is obviously determined by the technology of processing the job packages. Each job can begin only after completion of its predecessors. The vertices of the graph correspond to the jobs, the edges indicate the precedence relations. The

terminal vertices correspond to the completion of the products processing. For each vertex j of the graph, we know the deterministic processing time l_j (an integrated value indicating the allocated resources: material, human, production, etc.; the critical path of each product determines its processing time). Also, we are given a weight ω_i for each job $i \in I$ where I is the set of terminal vertices identified with a set of products. The value of weight is determined by the potential complexity and importance of those jobs, without which, in general, the product cannot be released. Also, an ambiguity of the jobs related to the need of obtaining a new scientific solution may affect the weight's value. Jobs are processed by a limited set of resources divided into separate, sufficiently autonomous units: *multi-resources*. A multi-resource is a stable group of shared resources, for example, a brigade, a group of equipment of the same type, single-profile subdivision. Multi-resources can be physically located in the same or in different organizations. In the general case, a multi-resource may include equipment of different types. This is determined by the production need or if it allows more efficient fulfillment of the specified orders.

We need:

- to find an order portfolio that maximizes the total profit according to the chosen optimization criterion; it should fit the beginning date of the planned period and the due dates specified by the customers;
- to build for this order portfolio a feasible (not violating the due dates) operational plan of the jobs packages processing on multi-resources; it should maximize the start time of the earliest job, i.e. the time corresponding to the minimum possible processing time of the entire order portfolio.

The five basic optimization criteria are the enterprise's total profit maximization for the following five cases:

- 1) in the absence of product's due dates. It is shown in [7, 10] that the criterion in this case is equivalent to the total weighted completion time of products minimization criterion with a partial order given on the set of jobs of each product (the TWCT problem);
- 2) subject to the condition: each product $i \in I$ has a due date d_i that must not be violated (just in time planning).
- 3) subject to the conditions: each product $i \in I$ has a due date d_i ; the total weighted tardiness of tasks in regard to their due dates must be minimized.
- 4) subject to the conditions: each product $i \in I$ has a due date d_i and a given absolute value of profit ω_i for its processing. The profit does not depend on the completion time of the task if it is not tardy in regard to its due date. Otherwise, the planning system's profit for this task is zero;
- 5) subject to the conditions: all products have due dates d_i . We need to minimize the total cost (penalty for the planning system) both for earliness and tardiness in regard to the due dates.

The Problem Solving Methodology. The problem in this formulation is a multi-stage scheduling problem (MSSP). Experts together with specialists in applied

mathematics should present the initial technological process in the form of an MSSP adequate to the actual production process. Examples of such presentation of MSSP are given in [10, 11].

The optimization problem in this formulation cannot be solved efficiently. We cannot obtain exact solutions of MSSP because of its practical complexity. Approximate solutions basically converge to a step-by-step optimization which does not take into account the possibility of searching for a global optimum by a given criterion. Therefore, an hierarchical approach to the planning problem was proposed in [7–9] containing the following three levels.

Level 1: preliminary (predictive) planning. This level includes:

a) building a model of technological aggregation to reduce the problem's dimension. This is the aggregation of the original precedence graph to the level of multi-resources (stable groups of resources working together) and aggregated jobs construction (combining related operations of the same product executed on the same multi-resource). The processing time of an aggregated job is determined by its critical path in this multi-resource;

b) building a model of design aggregation. This is the graph of critical paths of the products processing with common vertices. In the graphs where each vertex has a processing time, the critical path is the route of the maximum total length. Procedures for finding a critical path in the graph are discussed in detail in [8]. A graph of critical paths constructed by such rules has a smaller size, since it includes only vertices on critical paths. Thus, we aggregate the model to a "single machine" representation. Some aggregated jobs may process on multi-resources that require a setup (preparatory work) to process jobs with different characteristics. We combine such jobs, according to certain rules, into common aggregated job if such jobs do not require the setup of the multi-resource when changing one job to another. We indicate this on the precedence graph by common vertices. In this case, the setup is required only at the beginning of the schedule and each time when the multi-resource switches from processing "common vertex" jobs to other aggregated jobs;

c) TWCTZ problem solving [7]. This problem serves to determine the priorities of the products and the processing order of the aggregated jobs. This, in turn, is the basic information for solving problems on the second and third levels of the model. It was shown in [7] that we can approximate any of the five basic criteria by a TWCTZ problem with corresponding weighting coefficients. The algorithm is described in [7], its modification in [10]. As a result, we obtain a priority-ordered sequence of aggregated jobs with a breakdown to maximum priority subsequences (MPSS).

Level 2: coordinated planning. It includes:

a) preliminary distribution of the aggregated jobs of the constructed graph of critical paths. We break down the common vertices to clarify the information about their combining at the distribution stage. To implement the coordinated planning, we have developed the following distribution algorithms [7, 10]:

- compact schedules construction (algorithm 1). We distribute the products from the beginning of the planning period and minimize their completion times by this algorithm;

- nondelay schedules construction (algorithm 2). We distribute the products from their due dates set by the customers;

- construction of schedules that ensure highest priority products processing in the specified due dates (algorithm 3);

b) redefining the set of common vertices according to the actual distribution information. If the set of common vertices has changed, then we rebuild the model and construct a new sequence of aggregated jobs (re-solve the TWCTZ problem). To do this, we again perform the procedures starting with the building the graph of the critical paths of products. To build the graph, we use the set of common vertices obtained during aggregated jobs distribution;

c) complementing the priority ordered sequence obtained as a solution of the TWCTZ problem with aggregated jobs which lie outside of products' critical paths. We assign corresponding MPSS numbers to the added jobs;

d) distribution of the obtained schedule among multi-resources with binding to the planned period. We do it using one of the above distribution algorithms, with such exceptions:

- we perform the algorithm on a initial precedence graph of the aggregated jobs;

- we partition the aggregated jobs into batches (the number of iterations is equal to the number of batches, we perform the iterations for batches instead of one iteration for aggregated jobs with full processing time);

e) as a result of multiple performing of actions described above, we generate a whole series of possible feasible plans that differ in a specific type of criterion, due dates, weight coefficients, manufacturing technology. Experts evaluate obtained plans (alternatives) in different contexts and choose the best plan to pass it to the third level of the model. The modified Analytic Hierarchy Process can be used to evaluate the plans [12]. Its use allows to make a reasonable choice of production plan from the set of feasible ones under conditions of uncertainty.

If we could not obtain a plan satisfying the specified requirements, the informational model of the first level is subject to adjustment. We can exclude or add new products, purchase new equipment, change the production technology, etc.

Thus, after performing the first two levels of the planning model, we obtain:

the optimal portfolio of orders as the experts exclude from the execution some products or their parts that violate the customer's due dates (they do the exclusion if purchasing an additional equipment or delay products is undesirable); the coordinated plan of the aggregated jobs processing in multi-resources approved for implementation by the experts;

the due dates in the MSSP are determined by the completion times of the products in the approved plan.

Level 3: exact (operational) planning, includes [10]:

a) disaggregation of multi-resources and aggregated jobs to the level of the initial technological model;

b) the most compact operational plan is an arbitrary feasible (not violating the due dates we got at the second level of the model) solution of the MSSP by the criterion of maximizing the start time of the earliest job. An example of methodology to solve an MSSP is given in [10].

Thus, after performing the first two levels of the three-level model – independently of the production type considered, whatever is the original production technology, and no matter how the MSSP is implemented – we reduce the planning problem solving for any of the five above optimality criteria to obtaining a feasible MSSP solution for the criterion of maximizing the start time of the earliest job. For different optimality criteria, only the due dates in MSSP vary. The due dates are determined by the coordinated planning algorithm at the second level of the model. And they, in turn, depend on the priority-ordered sequence of aggregated jobs obtained as a solution of the TWCTZ problem.

Thus, the efficiency of the MSSP solution depends on the efficiency of the TWCTZ problem solution. Now we justify the efficiency of the three-level model for planning of arbitrary objects with a network representation of the technological process with optimization according to any of the above five criteria.

Efficiency research of TWCTZ problem solving algorithms. *The TWCTZ Problem Statement* [10]. A partial order on the set of tasks $J = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ is given by an oriented acyclic graph G . We know a processing time l_j for each task j of the graph G . Each terminal vertex (without successors) of the graph has a weight ω_j . Other vertices have zero weight. We need to find a sequence of tasks that minimizes the functional: $\sum \omega_j C_j \rightarrow \min$ where \tilde{N}_j is the completion time of a task j . Here, the tasks mean aggregated jobs. G is the graph constructed on the products' critical paths. The common vertices in the graph indicate common aggregated jobs for different products.

Exact algorithm for TWCT problem solving is given in [13], polynomial approximation algorithm for TWCTZ problem solving see [7].

To study the efficiency of TWCTZ problem solving algorithms, we have developed two generators of benchmark instances. The first one generated arbitrary precedence graphs with a given completeness $g = e/(n(n-1)/2) \times 100\%$ where e is the number of arcs in the graph and n is the number of vertices. We generated the graphs taking into account the required percentage k of the number of terminal (weighted) vertices. The second generator determined the weights of the terminal vertices and the processing times of all jobs. The parameters were set in such ranges:

- $n = [500, 750, 1000, 3000, 5000, 10000]$;
- $g = [2, 5, 7, 10, 15, 25, 50, 75, 90, 95]$;
- $k = [5, 10, 20, 30, 40, 50]$;
- $\omega_j \in [0, 10]$ (uniform distribution);
- $l_j \in [0, 100]$ (uniform distribution).

We generated 20 instances for each dimension and parameters g and k . All 7200 generated instances were solved both by the exact PSC-algorithm [13] and the ap-

proximation algorithm from [7] on a computer with 1 GHz processor frequency. Then we averaged the data for all values of the parameter k . The solving results are summarized in Tables 1–4.

Table 1 – The average time to solve the problem by exactPSC-algorithm (in seconds)

$g \backslash n$	500	750	1000	3000	5000	10000
2	0.732	2.677	6.723	226.110	1159.41	10654.5
5	0.518	1.896	4.760	160.087	820.863	7543.40
7	0.463	1.693	4.250	142.955	733.018	6736.13
10	0.387	1.417	3.558	119.684	613.692	5639.57
15	0.294	1.077	2.703	90.910	466.152	4283.74
25	0.201	0.734	1.844	62.020	318.018	2922.45
50	0.117	0.428	1.076	36.176	185.497	1704.64
75	0.076	0.277	0.694	23.353	119.746	1100.42
90	0.081	0.298	0.747	25.125	128.831	1183.91
95	0.030	0.110	0.277	9.305	47.712	438.45

Table 2 – The average time to solve the problem by the approximation algorithm (in seconds)

$g \backslash n$	500	750	1000	3000	5000	10000
2	0.075	0.273	0.686	23.086	118.38	1087.83
5	0.055	0.200	0.501	16.850	86.401	793.991
7	0.050	0.182	0.456	15.348	78.699	723.208
10	0.043	0.157	0.393	13.228	67.829	623.316
15	0.034	0.125	0.313	10.528	53.983	496.085
25	0.025	0.093	0.233	7.840	40.198	369.405
50	0.018	0.066	0.165	5.538	28.394	260.933
75	0.014	0.050	0.125	4.203	21.550	198.037
90	0.016	0.058	0.147	4.929	25.276	232.278
95	0.006	0.022	0.056	1.876	9.620	88.401

Table 3 – The percentage of approximate solutions that coincide with the exact solution

$g \backslash n$	500	750	1000	3000	5000	10000
2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.2
7	100.0	100.0	100.0	99.2	99.2	99.2
10	100.0	99.2	100.0	100.0	99.2	99.2
15	99.2	99.2	98.3	99.2	98.3	98.3
25	99.2	98.3	99.2	98.3	98.3	98.3
50	98.3	97.5	98.3	98.3	97.5	97.5
75	98.3	98.3	97.5	97.5	97.5	96.7
90	97.5	96.7	96.7	97.5	96.7	96.7
95	96.7	95.8	95.8	95.8	95.8	95.0

Table 4 – The average percentage of deviation of approximate solutions from the optimum

$g \backslash n$	500	750	1000	3000	5000	10000
2	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	0.56
7	–	–	–	0.79	0.80	0.83
10	–	0.59	–	–	1.04	0.92
15	0.71	0.81	1.68	0.80	1.65	1.25
25	0.78	1.60	0.93	1.59	1.52	1.63
50	1.30	2.41	1.83	1.71	2.49	2.57
75	1.57	1.70	2.45	2.58	2.53	3.45
90	2.33	3.19	3.35	2.51	3.32	3.48
95	3.10	3.87	3.97	3.70	4.35	4.94

On average for all runs, the solutions obtained by the approximation algorithm coincided with the solutions obtained by the exact PSC-algorithm for TWCT problem solving [13] in 98.47 % of cases.

To illustrate the dependence on the parameter k , we show in Table 5 the average solving time by the PSC-algorithm for 500 jobs instances.

Table 5 – Dependence of the solving time by the PSC-algorithm (ms) on the parameter k at $n = 500$

$g \backslash k$	5	10	20	30	40	50
2	304.216	350.791	563.722	791.327	1140.63	1238.54
5	57.960	132.291	313.470	583.533	929.815	1090.51
7	44.850	102.424	273.629	486.206	917.665	950.243
10	34.107	87.600	219.364	405.449	818.008	758.752
15	28.020	68.996	175.420	299.893	546.218	646.184
25	21.349	60.836	141.692	224.383	344.195	411.478
50	17.429	40.751	91.327	140.863	171.903	239.971
75	15.904	30.889	66.413	96.053	124.591	119.478
90	13.203	27.871	55.428	228.646	–	–
95	12.422	24.632	53.258	–	–	–

Thus, we can conclude that:

1. The approximation algorithm allows to solve real practical problems of large dimensions.
2. In comparison with the PSC-algorithm for the general case of the TWT problem, the solution time of the approximation algorithm is an order of magnitude shorter.
3. With an increase in the graph's completeness, the solving time decreases, but the accuracy of the solution of the approximation algorithm decreases.
4. The average percentage of the deviation of the solution obtained by the approximation algorithm from the optimum is 1.49 %.
5. The conditions of the polynomial component of the PSC-algorithm are not met on average for 1.53 % of the total number of instances;
6. With an increase in the percentage of the number of terminal vertices, the time to solve increases according to a law that is close to linear.

An example to the TWCT problem solving. Consider the graph of the critical paths of the three products shown in Fig. 1. We give the initial feasible sequence of tasks in Table 6. In tables 6 and 7, N is the vertex number in the graph of critical paths of products.

The exact PSC-algorithm for the problem solving is based on permutations of the following structures: a chain, an elementary construction, constructions K_1 and K_2 [13]. We build the constructions in the process of a problem solving on the basis of weighted tasks. We move these structures into earlier positions in the current sequence in accordance with their priorities. The interval of their move, as well as the combinatorics of their construction during the problem solving, is determined by common vertices which relate in the precedence graph with the structures under consideration. Obviously, the smaller the number of common vertices, the less complexity of the

algorithm execution. The above mentioned structures for permutations are not formed on zero-weighted tasks. Thus, the complexity of the problem solving is determined by the number of vertices loaded with weight and the number of common vertices.

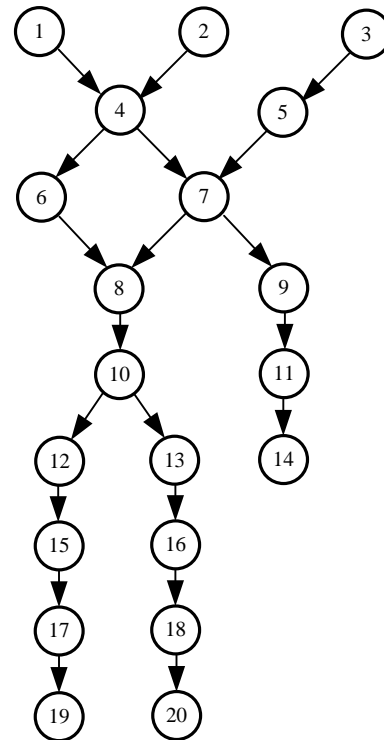


Fig. 1. Graph of products' critical paths

Table 6 – Initial feasible sequence for TWCTZ problem solving

N	ω_i	l_i	Common?	C_i
1	0	12	No	12
2	0	14	No	26
4	0	15	Yes	41
3	0	11	No	52
5	0	14	No	66
7	0	32	Yes	98
6	0	22	No	120
8	0	25	Yes	145
10	0	19	Yes	164
13	0	7	No	171
16	0	21	No	192
18	0	18	No	210
20	30	18	No	228
9	0	28	No	256
11	0	16	No	272
14	20	8	No	280
12	0	6	No	286
15	0	19	No	305
17	0	16	No	321
19	10	17	No	338

The priority-ordered sequence of aggregated jobs with a breakdown to MPSSes is the result of the problem solving by an exact algorithm [13]. We show it in Table 7.

The result of the problem solving by the approximation algorithm [7] coincides with that obtained by exact algorithm.

Table 7 – Initial feasible sequence for TWCTZ problem solving

N	ω_i	l_i	Common?	C_i	f_i
1	0	12	No	12	
2	0	14	No	26	
4	0	15	Yes	41	
3	0	11	No	52	
5	0	14	No	66	
7	0	32	Yes	98	
9	0	28	No	126	
11	0	16	No	142	
14	20	8	No	150	3000
6	0	22	No	172	
8	0	25	Yes	197	
10	0	19	Yes	216	
13	0	7	No	223	
16	0	21	No	244	
18	0	18	No	262	
20	30	18	No	280	8400
12	0	6	No	286	
15	0	19	No	305	
17	0	16	No	321	
19	10	17	No	338	3380

The optimal functional value is 14780.

As a result of the PSC-algorithm execution, the procedures associated with the enumeration of various constructions were not performed.

The approximation algorithm [7] is based on the algorithm for a series-parallel graph [7]. In contrast to the exact algorithm, the enumeration of various cases of the structures construction is excluded in advance in it. The solutions obtained by both algorithms coincided since in the solving process the conditions for the structures' formation and their enumeration were not fulfilled.

Conclusions. We have shown that whatever was set the initial manufacturing technology for products, an adequate scheduling model should be constructed to obtain the production operational plan. And then, obtaining a good operational plan for any of the five basic criteria of optimization reduces to a single uniform problem. We have to build a feasible schedule by the criterion of maximizing the start time of the earliest job for the multi-stage schedule problem adequate to the initial technological process of the production or object under consideration. For various optimization criteria, we have to change only the due dates determined at the second level of the three-level model as the completion times of the products during the coordinated planning. Since the efficient due dates depend on the efficient solution of TWCTZ problem, the three-level planning model is efficient when its first level is efficient.

We have shown that the approximation algorithm for TWCTZ problem solving [7] allows to solve real practical large size problems (we checked dimensions of up to 10000 jobs). The solutions obtained by the approximation algorithm coincided with those obtained by the exact

PSC-algorithm for TWCT problem solving [13] in 99.97 % cases. Hence, the polynomial algorithm proposed in [7] for TWCTZ problem, due to the presence of weights only on the terminal vertices of the job precedence graph, statistically significantly yields exact solution. We propose to use it in planning for arbitrary objects with a network representation of technological processes.

References

- Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 9, The four-level model of planning and decision making, pp. 347–406. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_8
- Bitran G. R., Haas E. A., Hax A. C. Hierarchical production planning: a single stage system. *Operations Research*, 1981, vol. 29, p. 717–743. doi: 10.1287/opre.29.4.717
- Bitran G. R., Hax A. C. Disaggregation and resource allocation using convex knapsack problems. *Management Science*, 1981, vol. 27, p. 431–441. doi: 10.1287/mnsc.27.4.431
- Bitran G. R., Hax A. C. On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Science*, 1977, vol. 8, p. 28–55. doi: 10.1111/j.1540-5915.1977.tb01066.x
- Bitran G. R., Tirupati D. Hierarchical production planning / S. C. Graves, A. H. G. Rinnooy Kan, P. H. Zipkin (eds.). *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 1993, vol. 4, p. 523–568. doi: 10.1016/s0927-0507(05)80190-2
- Hax A. C., Meal H. C. Hierarchical integration of production planning and scheduling. *Studies in Management Sciences*, 1975, vol. 1, p. 53–69.
- Згуровський М. З., Павлов А. А. *Прийняття рішень в мережних системах з обмеженими ресурсами*. Київ: Наук. думка, 2010. 573 с.
- Павлов О. А., Місюра О. Б., Мельников О. В., Щербатенко О. В., Михайлов В. В. Загальна схема планування та управління складними об'єктами, що мають мережне представлення технологічних процесів й обмежені ресурси. *Вісник Нац. техн. ун-та Укр. «КПІ»*. Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Київ: ВЕК+. 2009. № 49. С. 77–87.
- Павлов О. А., Місюра О. Б., Мельников О. В., Аракелян Г. А., Щербатенко О. В., Михайлов В. В., Лисецький Т. М. Інформаційна технологія ієрархічного планування та прийняття рішень в організаційно-виробничих системах. *Вісник Нац. техн. ун-та Укр. «КПІ»*. Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Київ: ВЕК+. 2010. № 52. С. 3–14.
- Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 9, Algorithms and software of the four-level model of planning and decision making, pp. 407–518. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_9
- Згуровський М. З., Павлов А. А., Мисюра О. Б., Мельников О. В., Лисецький Т. Н. Методологія побудови чотирирівневої моделі планування, прийняття рішень і оперативного планування в мережних системах з обмеженими ресурсами. *Вісник Нац. техн. ун-та Укр. «КПІ»*. Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Київ: ВЕК+. 2014. № 61. С. 60–84.
- Павлов А. А., Лисецький Т. Н. Нестационарный метод анализа иерархий в задачах иерархического планирования и принятия решений. *Вісник Нац. техн. ун-та Укр. «КПІ»*. Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Київ: ВЕК+. 2011. № 54. С. 82–86.
- Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 7, The total weighted completion time of tasks minimization with precedence relations on a single machine, pp. 291–344. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_7

References (transliterated)

- Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 9, The four-

- level model of planning and decision making, pp. 347–406. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_8
2. Bitran G. R., Haas E. A., Hax A. C. Hierarchical production planning: a single stage system. *Operations Research*, 1981, vol. 29, pp. 717–743. doi: 10.1287/opre.29.4.717
 3. Bitran G. R., Hax A. C. Disaggregation and resource allocation using convex knapsack problems. *Management Science*, 1981, vol. 27, pp. 431–441. doi: 10.1287/mnsc.27.4.431
 4. Bitran G. R., Hax A. C. On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Science*, 1977, vol. 8, pp. 28–55. doi: 10.1111/j.1540-5915.1977.tb01066.x
 5. Bitran G. R., Tirupati D. Hierarchical production planning / S. C. Graves, A. H. G. Rinnooy Kan, P. H. Zipkin (eds.). *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 1993, vol. 4, pp. 523–568. doi: 10.1016/s0927-0507(05)80190-2
 6. Hax A. C., Meal H. C. Hierarchical integration of production planning and scheduling. *Studies in Management Sciences*, 1975, vol. 1, pp. 53–69.
 7. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Prinyatiye resheniy v setevykh sistemakh s ogranichennymi resursami* [Decision making in network systems with limited resources]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 2010. 573 p.
 8. Pavlov O. A., Misura O. B., Melnikov O. V., Shcherbatenko O. V., Mykhaylov V. V. Zahal'na skhema planuvannya ta upravlinnya skladnyimi ob'yektamy, shcho mayut' merezhne predstavleniya tekhnolohichnykh protsesiv y obmezheni resursy [The general scheme of planning and management of complex objects that represent network processes and have limited resources]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta Ukr. "KPI". Seriya: Informatyka, upravlinnya ta obchyslyval'na tekhnika* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Informatics, operation and computer science]. Kiev, VEK+ Publ., 2009, no. 49, pp. 77–87.
 9. Pavlov O. A., Misura O. B., Melnikov O. V., Arakelyan G. A., Shcherbatenko O. V., Mykhaylov V. V., Lisetsky T. N. Informatsiy-na tekhnolohiya iyerarkhichnoho planuvannya ta pryynyattya rishen' v orhanizatsiy-no-vyrobnychykh systemakh [The system of hierarchical planning and decision making in organizational and production systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta Ukr. "KPI". Seriya: Informatyka, upravlinnya ta obchyslyval'na tekhnika* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Informatics, operation and computer science]. Kiev, VEK+ Publ., 2010, no. 52, pp. 3–14.
 10. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 9, Algorithms and software of the four-level model of planning and decision making, pp. 407–518. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_9
 11. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A., Misura E. B., Melnikov O. V., Lisetsky T. N. Metodologiya postroeniya chetyrekhurovnevoy modeli planirovaniya, prinyatiya resheniy i operativnogo planirovaniya v setevykh sistemakh s ogranichennymi resursami [Implementation of the methodology of the four-level model of planning, decision-making and operational management in networked systems with limited resources]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta Ukr. "KPI". Seriya: Informatyka, upravlinnya ta obchyslyval'na tekhnika* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Informatics, operation and computer science]. Kiev, VEK+ Publ., 2014, no. 61, pp. 60–84.
 12. Pavlov A. A., Lisetsky T. N. Nestatsionarnyy metod analiza ierarkhiy v zadachakh ierarkhicheskogo planirovaniya i prinyatii resheniy. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta Ukr. "KPI". Seriya: Informatyka, upravlinnya ta obchyslyval'na tekhnika* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Informatics, operation and computer science]. Kiev, VEK+ Publ., 2011, no. 54, pp. 82–86.
 13. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications*. Cham (Switzerland): Springer, 2019. 526 p. Chapter 7, The total weighted completion time of tasks minimization with precedence relations on a single machine, pp. 291–344. doi: 10.1007/978-3-319-98977-8_7

Received 16.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисецький Тарас Миколайович (Лисецкий Тарас Николаевич, Lisetsky Taras Nikolayevich) – старший розробник приватного акціонерного товариства «ОПІ»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8823-9256>; e-mail: taras.lisetsky@gmail.com

О. О. МІЩЕНКО, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. Ф. ШАПО, В. О. ГУЖВА

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ПРОГРАМНИХ ПРОЄКТІВ

Ідентифікована проблема оцінки ризиків програмних проєктів. Проведено огляд сучасних підходів до оцінки ризиків. Виконаний аналіз методів оцінки ризиків програмних проєктів, розглянуто аналіз чутливості, метод сценаріїв, імітаційне моделювання, експертне оцінювання. Зроблені висновки про важливість оцінки ризиків для етапу проєктування програмних систем класу «програмне забезпечення, як послуга». Запропоновано оцінку ризиків програмних проєктів виконувати з використанням експертного оцінювання за допомогою реалізації відповідної інформаційної технології. Математично технологія оцінки ризиків реалізується за допомогою методу Дельфі та ранжирування. Поняття довірчого інтервалу використовується у вигляді критерію зупинки в обчислювальній процедурі методу Дельфі з метою отримання узгодженої експертної думки. Обчислювальна процедура передбачає, як коригування вихідних експертних даних за рахунок перегляду експертних думок, так і корекцію складу експертної групи. Узгодженість експертних думок математичної технології за методом ранжирування перевіряється з використанням коефіцієнта конкордації Кендалла, а його значимість оцінюється на основі критерію Пірсона. Представлений математичний апарат формалізує вирішення проблеми оцінки ризиків. Методи оцінки ризиків програмних проєктів і їх математичні технології вимагають великої кількості обчислювальних операцій. Інформаційна підтримка збільшує швидкість і точність таких операцій, забезпечує накопичення вихідних даних і отриманих результатів. Інформаційна підтримка оцінки ризиків програмних проєктів реалізована у вигляді програмної системи. До розробки системи були визначені функціональні та нефункціональні вимоги, модель бази даних і безпосередньо її структура. Використовувалися принципи об'єктно-орієнтованого аналізу, моделювання даних, сучасні патерни проєктування, CASE-засоби. Запропоновано реалізувати програмну систему інформаційної технології відповідно до архітектури «клієнт сервер» виділивши application server, з розподіленими правами доступу, за допомогою IDE NetBeans засобами PHP під управлінням MySQL. Зроблено висновки про можливість використання програмної системи за допомогою виконаної валідації та верифікації з використанням експертизи та PHPUnit. Результати роботи можуть бути використані при розробці інформаційної технології управління ризиками програмних проєктів.

Ключові слова: оцінка ризиків, програмний проєкт, експертне оцінювання, метод Дельфі, метод ранжування, вимоги, модель, структура, програмна система

А. А. МИЩЕНКО, В. Ю. ВОЛОВЩИКОВ, В. Ф. ШАПО, В. А. ГУЖВА

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРОГРАМНЫХ ПРОЕКТОВ

Идентифицирована проблема оценки рисков программных проектов. Проведен обзор современных подходов к оценке рисков. Выполнен анализ методов оценки рисков программных проектов, рассмотрены анализ чувствительности, метод сценариев, имитационное моделирование, экспертное оценивание. Сделаны выводы о важности оценки рисков для этапа проектирования программных систем класса «программное обеспечение, как услуга». Предложено оценку рисков программных проектов выполнять с использованием экспертного оценивания посредством реализации соответствующей информационной технологии. Математически технология оценки рисков реализуется посредством метода Дельфи и ранжирования. Понятие доверительного интервала используется в виде критерия останковки в вычислительной процедуре метода Дельфи с целью получения согласованного экспертного мнения. Вычислительная процедура предусматривает, как коррекцию исходных экспертных данных за счет пересмотра экспертных мнений, так и коррекцию состава экспертной группы. Согласованность экспертных мнений в математической технологии по методу ранжирования проверяется с использованием коэффициента конкордации Кендалла, а его значимость оценивается на основе критерия Пирсона. Представленный математический аппарат формализует решение проблемы оценки рисков. Методы оценки рисков программных проектов и их математические технологии требуют большого количества вычислительных операций. Информационная поддержка увеличивает скорость и точность таких операций, обеспечивает накопление исходных данных и полученных результатов. Информационная поддержка оценки рисков программных проектов реализована в виде программной системы. К разработке системы были определены функциональные и нефункциональные требования, модель базы данных и непосредственно ее структура. Использовались принципы объектно-ориентированного анализа, моделирования данных, современные паттерны проектирования, CASE-средства. Предложено реализовать программную систему информационной технологии в соответствии с архитектурой «клиент сервер», выделенным application server, с распределенными правами доступа, с помощью IDE NetBeans средствами PHP под управлением MySQL. Сделаны выводы о возможности использования программной системы посредством выполненной валидации и верификации с использованием экспертизы и PHPUnit. Результаты работы могут быть использованы при разработке информационной технологии управления рисками программных проектов.

Ключевые слова: оценка рисков, программный проект, экспертное оценивание, метод Дельфи, метод ранжирования, требования, модель, структура, программная система

O. O. MISHCHENKO, V. Y. VOLOVSHCHUKOV, V. F. SHAPO, V. A. GUZHVA

INFORMATION TECHNOLOGY OF SOFTWARE PROJECTS RISKS EVALUATION

Problem of software projects risks evaluation is identified. Review of modern approaches to risks evaluation is carried out. Analysis of software projects risks evaluation methods is performed. Analysis of sensitivity, scenarios method, simulation modeling, expert assessment are reviewed. Conclusions on importance of risks evaluation for "software as a service" software application systems at design stage are performed. It's proposed to perform software projects risks evaluation with expert assessment using by realization of corresponding information technology. Mathematically risks evaluation technology is realized by Delphi method and ranking. Term of confidence interval is used as stopover criterion in computational procedure of Delphi method with the goal of coherent expert opinion obtaining. Calculating procedure envisages initial expert data correction by expert opinions revision and correction of expert group personnel. Consistency of expert opinions in mathematical technology on ranking method is checking with using of Kendall concordance coefficient, and its significance is evaluating on the basis of Pearson criterion. Presented mathematical apparatus formalizes solution of risks evaluation problem. Methods of software projects risks evaluation and their mathematical technologies requires a big amount of calculating operations. Information support increases the rate and precision of such operations, ensures initial data and obtained results accumulation. Information support of software projects risks evaluation is realized as software application system. At development of software application system functional and nonfunctional requirements, database model and its structure were defined. Principles of object oriented analysis, data modeling, modern design patterns, CASE software tools were used. It's proposed to realize software application system of information technology in accordance with client-server architecture, dedicated application server with distributed access rights with using of IDE NetBeans by PHP means under MySQL control. Conclusions on possibility of software application system using by performed validation and verification with expertise and

© О. О. Міщенко, В. Ю. Воловщикова, В. Ф. Шапо, В. О. Гужва, 2018

PHPUnit using are made. Results of this work may be used for development of software projects risks evaluation information technology.

Keywords: risk evaluation, software project, expert assessment, Delphi method, ranking method, requirements, model, structure, software application system

Вступ. В ході виконання програмних проєктів (ПП) на кожному з етапів [1] життєвого циклу (ЖЦ) програмних систем (ПС) в більшій або меншій мірі можна зіткнутися з ймовірними втратами. Наприклад, зниження якості кінцевої ПС, підвищення вартості її розробки, затримка закінчення розробки та інші. Такі втрати проявляються як наслідки ризиків, які виникають в ЖЦ ПС. Тому при реалізації ПП однією з первинних невід'ємних проблем, яку необхідно вирішувати, є ідентифікація та оцінка ризиків ПП.

Проблема оцінки ризиків програмних проєктів. Питання оцінки ризиків на теперішній час є досить актуальними в різноманітних прикладних галузях. Безвідносно до будь-якої сфери діяльності можна стверджувати на основі аналізу [2, 3, 4], що оцінка ризиків проєктів може бути досліджена з використанням двох підходів: якісного та кількісного.

Основна особливість якісного підходу полягає в проведенні ідентифікації ризиків, їх оцінці та розробці заходів по боротьбі з ними. Кількісний аналіз базується на інструментарії теорії ймовірності, математичній статистиці та теорії нечітких множин. Кількісний аналіз в числовому вимірі оцінює вплив зміни ризикованих факторів на зміну ефективності проєкту.

Суттєвий ріст ІТ галузі, збільшення розмірів ПП, відношення до ПП, як до продукту зі своїм особливим технологічним процесом, призводить до того, що важливою постає проблема оцінки ризиків і для ПП. Відповідно до аналізу [3, 4] можна стверджувати, що ризики ПП можна категоризувати різним чином. Один з можливих варіантів: ризик проєктування, технічний ризик та бізнес-ризик. Це означає, що кожна група, маючи свої особливості, має використовувати для дослідження свої особливі підходи [3, 4]. Останнє означає, що важливим стає адаптація існуючих підходів як з точки зору математичної бази, так і інформаційної.

Таким чином, можна стверджувати, в тому числі спираючись на аналіз [4, 5], що проблема оцінки ризиків ПП є складною, багатоаспектною та потребує вирішення.

Аналіз існуючих методів. Методи оцінки ризиків ПП можна поділити на кількісні та якісні [6–8]. До кількісних відносяться аналіз чутливості, метод сценаріїв та імітаційне моделювання методом Монте-Карло [6, 7]. Якісним прийнято вважати експертне оцінювання [8].

Аналіз чутливості є відносно простим методом, який дозволяє з'ясувати, які саме чинники можна віднести до найбільш ризикованих. Найчастіше цей метод застосовують для визначення ступеня впливу зміни умов реалізації проєкту на значення будь-якого показника. У ході цього аналізу визначається ступінь стійкості проєкту до впливу зовнішнього або внутрішнього середовища.

Сценарний аналіз – метод неформалізованого

опису ризику проєкту, що включає оцінку чутливості найбільш значимого показника для даного проєкту до зміни ряду факторів, а також оцінку можливості спільної дії факторів. За сценарним аналізом можуть бути розраховані очікуване значення показника, стандартне відхилення і коефіцієнт варіації. Коефіцієнт варіації аналізованого проєкту порівнюється з коефіцієнтами варіації проєктів-аналогів. Якщо коефіцієнт варіації перевищує коефіцієнт варіації проєкту-аналога, то це свідчить про значний ризик.

Мета імітаційного моделювання полягає у відтворенні поведінки досліджуваної системи на основі результатів аналізу найбільш суттєвих взаємозв'язків між її елементами або, іншими словами, в розробці симулятора досліджуваної предметної області для проведення різних експериментів. Імітаційне моделювання по методу Монте-Карло дозволяє побудувати математичну модель для проєкту з невизначеними значеннями параметрів, і, знаючи ймовірнісні розподіли параметрів проєкту, а також кореляцію між параметрами отримати розподіл ризиків проєкту.

Інтерв'ювальні методи використовуються для якісної оцінки ймовірності та наслідків ризиків на цілі ПП. Інтерв'ювання ризиків з зацікавленими сторонами проєкту та експертами, може стати першим кроком у процесі якісного аналізу ризиків. Необхідна інформація залежить від типу розподілу ймовірностей, які будуть використані. Якісний аналіз ризиків ПП включає в себе розстановку рангів для ідентифікованих ризиків. Для ідентифікації та аналізу ризиків в експертному оцінюванні найчастіше використовують методи мозкового штурму, Дельфі, контрольних списків та ранжування. Аналіз і оцінка ризиків здійснюються з метою перетворення здобутих у ході ідентифікації даних в інформацію, що дозволяє приймати відповідальні рішення. Основним виходом процесу якісного аналізу є список ранжированих ризиків з обчисленими оцінками.

Постановка задачі. Аналіз робіт [1, 4, 5, 9–11] показав, що якісна оцінка ризиків ПП є важливим етапом у ЖЦ ПС, зокрема ризиків етапу проєктування у такому типі ПС як «програмне забезпечення як послуга». Виходячи з цього, процес вирішення задачі автоматизації якісної оцінки ризиків ПП є актуальним. Для вирішення задачі оцінки ризиків ПП в роботі пропонується використання експертного оцінювання методами Дельфі та ранжування. Ці методи підвищують можливість отримання якісного вірогідного результату, позбавленого суб'єктивності окремих думок експертів. Процедура використання методів враховують отримання результатів, що відповідають узгодженості думок експертів. Отримані результати дозволяють ранжувати ризики та наглядно відобразити їхні показники.

Реалізація процедури оцінки ризиків ПП може дозволити побудувати ефективні процедури управління ризиками. В тому числі, як наслідок, уникнути або

зменшити останні. Виходячи з цього проблема оцінки ризиків ПП залишається досить актуальною. В умовах постійного підвищення складності та обсягів ПП важливим також стає розробка відповідних інформаційних технологій.

Таким чином, метою роботи є побудова інформаційної технології оцінки ризиків ПП.

Технологія оцінки ризиків програмних проєктів. При оцінці ризиків ПП типу «програмне забезпечення як послуга» в роботі пропонуються наступні формалізації методу Дельфі та ранжування.

Припустимо, що виділено K питань, кожне з яких представлено якісно в формі q_k , $k = \overline{1, K}$. Для отримання відповідей нехай сформована група з N експертів. Кожен i -й експерт формує самооцінку s_i та надає чисельну оцінку q_k^i за q_k , використовуючи шкалу від 1 до 10. З метою аналізу даних обчислюються наступні показники: середньогрупова оцінка:

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i;$$

прості оцінки:

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_k^i, k = \overline{1, K};$$

середньозважені оцінки:

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^N s_i q_k^i}{\sum_{i=1}^N s_i}, k = \overline{1, K};$$

медіани:

$$m_k = Me[q_k^i, i = \overline{1, N}], k = \overline{1, K};$$

довірчі інтервали $c_k = [c_k, \bar{c}_k]$ на базі:

$$c_k = q_k^{\min} + \frac{q_k^{\max} - q_k^{\min}}{4}, k = \overline{1, K};$$

$$\bar{c}_k = q_k^{\max} - \frac{q_k^{\max} - q_k^{\min}}{4}, k = \overline{1, K};$$

$$q_k^{\min} = \min_{i=1, N} q_k^i, k = \overline{1, K};$$

$$q_k^{\max} = \max_{i=1, N} q_k^i, k = \overline{1, K};$$

довжини довірчих інтервалів:

$$l_k = \bar{c}_k - c_k, k = \overline{1, K}.$$

Отримані результати аналізуються експертами та у випадку необхідності корегуються поки не буде отримана узагальнена думка за критерієм довжини довірчого інтервалу.

Відповідно до отриманих результатів за методом Дельфі можна робити висновки щодо загрози ризиків, сформульованих у вигляді K запитань. Для цього a_k ранжуються. Найбільш небезпечному ризику відповідає $\max_{k=1, K} a_k$ і так далі. Відповідно реагування на такі

ризиків повинні відбуватися в першу чергу. Інші показники є додатковими та можуть бути використані у подальшій розробці плану управління ризиками.

Якщо припустити, що експерти можуть суворо ранжувати ризики за зменшенням важливості та привласнити їм числа від 1 до K , до оцінки ризиків ПП можна застосувати метод ранжування. В цьому випадку вихідною інформацією є R_{ik} – ранг, що надається кожним i -м експертом за k -м ризиком.

Узагальнюючи R_{ik} слід обчислити ранги $\bar{R}_k = \sum_{i=1}^N R_{ik}$, на основі яких ранжуються ризики. Ризик з найбільшим рангом є найбільш небезпечним.

Аналізуючи R_{ik} рекомендовано визначати узгодженість думок експертів. В роботі для цього пропонується застосовувати коефіцієнт конкордації Кендалла:

$$W = \frac{12 \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N R_{ik} - \frac{N(K+1)}{2} \right)^2}{N^2(K^2 - K)}.$$

З метою перевірки значущості коефіцієнта конкордації пропонується обчислювати критерій Пірсона:

$$\chi^2 = N(K-1)W.$$

Інформаційна підтримка оцінки ризиків програмних проєктів. В сучасних умовах вирішення більшості задач не можливе без використання сучасних інформаційних технологій. Не є виключенням і задача оцінки ризиків ПП. З метою реалізації програмної частини інформаційної технології оцінки ризиків ПП було сформовано пакет функціональних та нефункціональних вимог, спроектована база даних (БД) та модель представлення компонентів системи.

Функціональні вимоги представлені на рис. 1 у вигляді діаграми прецедентів відповідно до UML.

До ключових нефункціональних вимог слід віднести: інтерфейс користувача повинен бути мінімальним та інтуїтивно зрозумілим, система повинна бути зручною у використанні та реалізовувати заявлену функціональність.

Полегшення зберігання та обробки інформації забезпечується БД. В роботі проєкт БД реалізовано засобами CASE-системи ERWin у вигляді моделі, наведеній на рис. 2. Запропонована структура забезпечує зберігання вихідної інформації (Risk), результатів дослідження (QuestionsMarks, Delfi_Lap, Results_MethodDelfi, RangingConsensus, Rang_Lap, RangingConsensus, Rangs) та персональних даних користувачів (User, Expert, Analyst).

Діаграма компонентів, представлена на рис. 3, ілюструє фізичне представлення компонентів системи на основі патерну MVC.

На вузлі Controller розгорнуті компоненти для обробки експертних оцінок, обчислення показників, ранжування ризиків та побудови за ними діаграм. Даний вузол також забезпечує аутентифікацію та перевірку ролі користувача.

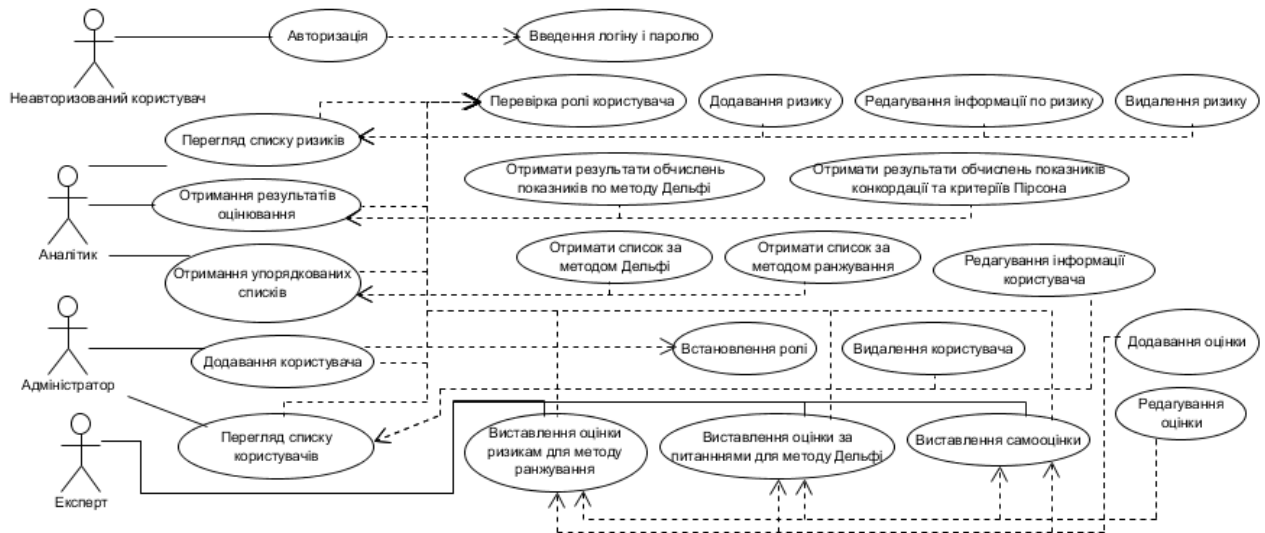


Рис. 1. Діаграма прецедентів

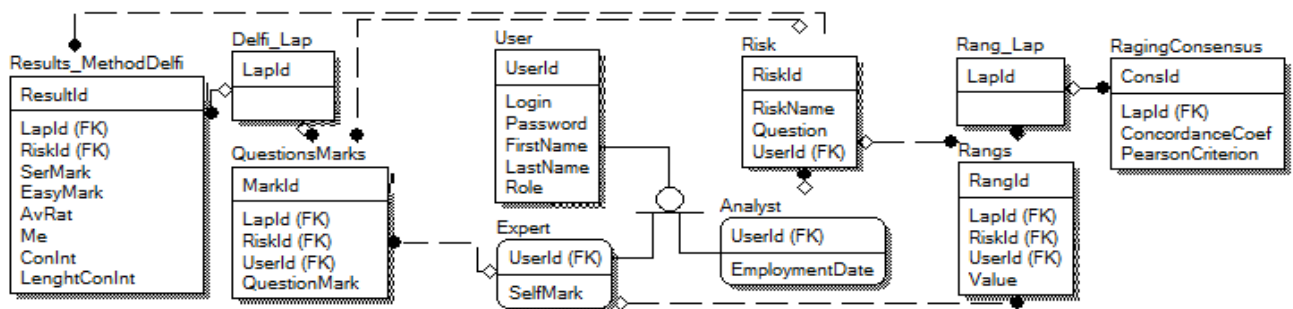


Рис. 2. Логічна модель БД

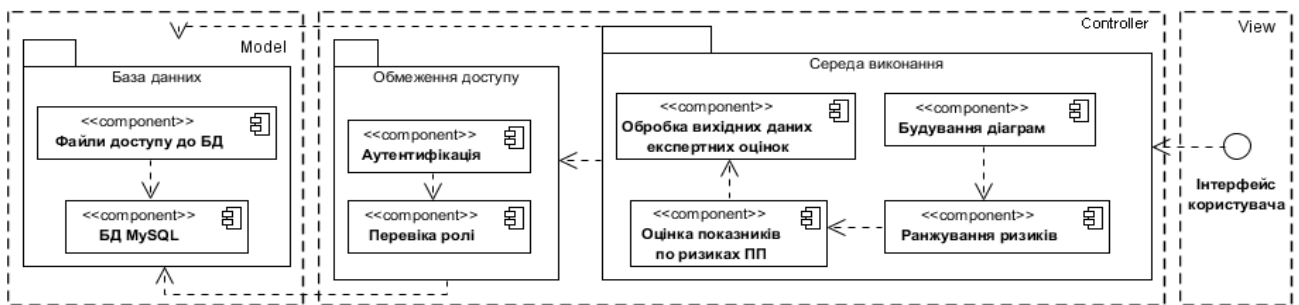


Рис. 3. Діаграма компонентів

Вузол Model реалізує програмні компоненти доступу до БД. Програмна система реалізована за допомогою середовища IDE NetBeans засобами PHP та функціонує під управлінням MySQL. Валідація програмної системи виконана зі застосуванням експертизи. Верифікація – модульним тестуванням за допомогою PHPUnit.

Висновки. Дана робота є логічним продовженням [12]. В роботі розглянута технологія оцінки ризиків ПП. Програмна система реалізована на основі патерна MVC, описано низкою діаграм, відповідає архітектурі типу «клієнт-сервер» з виділеним application server та автоматизує процес оцінки ризиків ПП. Запропонована інформаційна

технологія дозволить приймати раціональні рішення на підставі експертних даних. Подальші дослідження будуть спрямовані в напрямку розробки моделей управління ризиками ПП та відповідної інформаційної підтримки.

Список літератури

1. Елкина О. С. Экономика проектного управления: риски на разных стадиях жизненного цикла проекта. Часть1. *Сибирский торгово-экономический журнал*. Омск: Омский институт (филиал) РГТЭУ, 2015. № 2 (20). С. 12-15.
2. Шкурко В. Е. *Управление рисками проектов*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 184 с.
3. Найт, Ф. Х. *Риск, неопределенность и прибыль*. М.: Дело, 2003. 360 с.

4. Смирнов А. А., Коваленко А. В., Якименко Н. Н., Доренский А. П. Проблемы анализа и оценки рисков информационной деятельности. *Системы обработки информации* – Харьков, Харьковский университет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. Вип. 3 (140). С. 40–42.
5. Колоденкова А. Е. Оценка рисков создания программного обеспечения информационно-управляющих систем для высокорисковых промышленных предприятий в условиях интервальной неопределенности исходных данных. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. Уфа: УГАТУ, 2015. Т.19, № 1 (67). С. 192–199.
6. Project Management Institute. *A Guide to The Project Management Body of Knowledge (PMBOK)*, 2001. 211 с.
7. Липаев В. В. *Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств*. М.: СИНТЕГ, 2005. 224 с.
8. Слободский А. Л. *Риски в управлении персоналом*. СПб.: СПбГУЭФ, 2011. 155 с.
9. Фатрелл Р. Т., Шафер Д. Ф., Шафер Л. И. *Управление программными проектами: достижение оптимального качества при минимальных затратах*. М.: Вильямс, 2003. 1136 с.
10. Кантор М. *Управление программными проектами. Практическое руководство по разработке успешного программного обеспечения*. М.: Вильямс, 2002. 176 с.
11. Брагина Т. И., Табунщик Г. В. Анализ подходов к управлению рисками в программных проектах с итеративным жизненным циклом. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. № 2. С. 120–124.
12. Мищенко О. О., Воловщиков В. Ю., Шапо В. Ф. Модели оцінки ризиків програмних проєктів. *XXVI Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2018*. Харків, Травень 2018. С. 25.
4. Smirnov A. A., Kovalenko A. V., Yakimenko N. N., Dorensky A. P. Problemy analiza i otsenki riskov informatsionnoy deyatelnosti [Problems of analysis and evaluation of information activity risks]. *Sistemy obrobki informatsii* [Systems of information processing]. Kharkov, Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Forces Publ., 2016. Vip. 3 (140), pp. 40-42.
5. Kolodenkova A. E. Otsenka riskov sozdaniya programmnoho obespecheniya informatsionno-upravlyayushchikh sistem dlya vysokoriskovykh promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh interval'noy neopredelennosti iskhodnykh dannykh [Risk assessment of creating information management systems for high-risk industrial enterprises in the context of interval uncertainty of input data]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. Ufa, USATU Publ., 2015. V.19, № 1 (67), pp. 192–199.
6. Project Management Institute. *A Guide to The Project Management Body of Knowledge (PMBOK)*, 2001. 211 p.
7. Lipaev V. V. *Analiz i sokrashcheniye riskov proyektov slozhnykh programnykh sredstv* [Analysis and risk reduction of complex software projects]. Moscow, SINTEG Publ., 2005. 224 p.
8. Slobodsky A. L. *Risks in personnel management* [Risks in personnel management]. St. Petersburg, SPSUEF Publ., 2011. 155 p.
9. Fatrell R. T., Schafer D. F., Schafer L. I. *Upravleniye programnymi proyektami. Prakticheskoye rukovodstvo po razrabotke uspehnogo programmnoho obespecheniya* [Software Project Management: Achieving Optimal Quality with Minimal Cost]. Moscow, Williams Publ., 2003. 1136 p.
10. Kantor M. *Upravleniye programnymi proyektami. Prakticheskoye rukovodstvo po razrabotke uspehnogo programmnoho obespecheniya* [Management of software projects. A practical guide to developing successful software]. Moscow, Williams Publ., 2002. 176 p.
11. Bragina T. I., Tabunshchik G. V. Analiz podkhodov k upravleniyu riskami v programnykh proyektakh s iterativnym zhiznennym tsiklom [Analysis of risk management approaches in software projects with an iterative life cycle]. *Radioelektronika, informatika, upravlinnya* [Radio electronics, informatics, management]. Zaporizhzhya, ZNTU Publ., 2011. № 2. pp. 120–124.
12. Mishchenko O. O., Volovshchikov V. Y., Shapo V.F. Modeli otsinky ryzyviv prohramnykh proektiv [Models of risk assessment of software projects]. *XXVI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya MicroCAD-2018* [XXVI International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2018]. Kharkiv, May 2018, p. 25.

Надійшла (received) 13.11.2018

References (transliterated)

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мищенко Орина Олексіївна (Мищенко Арина Алексеевна, Mishchenko Oryna Oleksiivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-673X>; e-mail: arinohcka012@gmail.com

Воловщиков Валерій Юрійович (Воловщиков Валерий Юрьевич, Volovshchikov Valeriy Yuriyovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4454-2314>; e-mail: valera@kpi.kharkov.ua

Шапо Владлен Феліксович (Шапо Владлен Феликсович, Shapo Vladlen Felixovitch) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри теорії автоматичного управління і обчислювальної техніки; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-4159>; e-mail: stani@te.net.ua

Гужва Віктор Олексійович (Гужва Виктор Алексеевич, Guzhva Viktor Alexeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6832-448>; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

V. L. LYSYTSKYI, D. Y. ORLENKO

MODELS FOR THE FORMATION OF IT COMPANY STRATEGIC PORTFOLIO OF PROJECTS

Increasing of unpredictability, novelty and complexity of the external environment of modern enterprises of IT industry has led to the need of creating such management mechanisms that can ensure making of coordinated and effective decisions to adapt enterprises to the external competitive environment, ensure their survival and successful development. In order to adapt to rapidly changing environmental conditions it is necessary to apply management that is associated not so much with the definition of a strategic position (long-term and strategic planning), as with a timely, real-time response to rapid and unexpected changes. Formation of adequate management forces enterprises to engage in the refinement of the strategy and the solution of the arisen strategic tasks simultaneously and in parallel, to apply scientifically based management information technologies. Creation of such technologies requires the availability of adequate models of production activities of IT company. A set of interrelated models of forming a strategic portfolio of IT projects of a company, whose activity is aimed at creating a finite number of IT projects in the context of time and resource constraints, is proposed. A set of interrelated models for the formation of IT projects strategic portfolio activity of which is aimed at creating a finite number of unique software products in conditions of time and resource constraints is proposed. Qualitative and quantitative methods of modeling of IT company production activity were used while developing a set of models and generated a set of models of expert procedure and a set of models of optimization procedure. The set of expert procedure models for assessing of IT projects significance realizes the hierarchies analysis method. The set of models of optimization procedure implements the method of linear programming which allows to determine the effective structure of the IT projects portfolio in the medium term which ensures achievement of company strategic goals. Based on the developed set of models, a generalized algorithmic model for the formation of company strategic portfolio of projects is formed and can be used to create information technology for strategic planning of IT company production activities in conditions of dynamic external environment.

Keywords: set of models, optimization procedure, expert procedure, portfolio of projects, enterprise, information technology.

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, Д. Ю. ОРЛЕНКО

МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЧНОГО ПОРТФЕЛЯ ПРОЄКТІВ ІТ ФІРМИ

Підвищення непередбачуваності, новизни і складності зовнішнього середовища сучасних підприємств ІТ індустрії призвели до необхідності створення таких механізмів управління, які були б здатні забезпечити прийняття скоординованих і ефективних рішень по адаптації підприємств до зовнішнього конкурентного середовища і забезпечення їх виживання і успішного розвитку. Для адаптації до швидко змінюючихся умов середовища потрібне застосування управління, пов'язаного не стільки з визначенням стратегічної позиції (довгострокове і стратегічне планування), скільки зі своєчасною реакцією в реальному масштабі часу на швидкі і несподівані зміни. Формування адекватного управління змушує підприємства одночасно паралельно займатися уточненням стратегії і рішенням виниклих стратегічних задач, застосовувати науково обгрунтовані інформаційні технології управління. Створення таких технологій вимагає наявності адекватних моделей виробничої діяльності ІТ фірми. Пропонується комплекс взаємопов'язаних моделей формування стратегічного портфеля проєктів ІТ фірми, діяльність якої спрямована на створення кінцевого числа ІТ проєктів в умовах часових та ресурсних обмежень. При створенні комплексу моделей використані якісні і кількісні методи моделювання виробничої діяльності ІТ підприємства, що породили комплекс моделей експертної процедури і комплекс моделей оптимізаційної процедури. Експертна процедура забезпечує оцінку значущості ІТ проєктів з використанням методу аналізу ієрархій. Комплекс моделей оптимізаційної процедури реалізує метод лінійного програмування, що дозволяє в середньостроковій перспективі визначити ефективну структуру стратегічного портфеля ІТ проєктів, що забезпечує досягнення стратегічних цілей ІТ фірми. На основі побудованого комплексу моделей розроблено узагальнену алгоритмічну модель формування стратегічного портфеля ІТ проєктів, яка може бути використана при створенні інформаційної технології стратегічного планування виробничої діяльності ІТ підприємства в умовах динамічного зовнішнього середовища.

Ключові слова: комплекс моделей, оптимізаційна процедура, експертна процедура, портфель ІТ проєктів, підприємство, інформаційна технологія.

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, Д. Ю. ОРЛЕНКО

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ ИТ ФИРМЫ

Повышение непредсказуемости, новизны и сложности внешнего окружения современных предприятий ИТ индустрии привели к необходимости создания таких механизмов управления, которые способны обеспечить принятие скоординированных и эффективных решений по адаптации предприятий к внешней конкурентной среде и обеспечению их выживания и успешного развития. Для адаптации к быстро меняющимся условиям среды требуется применение управления, связанного не столько с определением стратегической позиции (долгосрочное и стратегическое планирование), сколько со своевременной реакцией в реальном масштабе времени на быстрые и неожиданные изменения. Формирование адекватного управления вынуждает предприятия одновременно параллельно заниматься уточнением стратегии и решением возникших стратегических задач, применять научно обоснованные информационные технологии управления. Создание таких технологий требует наличия адекватных моделей производственной деятельности ИТ фирмы. Предлагается комплекс взаимосвязанных моделей формирования стратегического портфеля проектов ИТ фирмы, деятельность которой направлена на создание конечного числа ИТ проектов в условиях временных и ресурсных ограничений. При создании комплекса моделей использованы качественные и количественные методы моделирования производственной деятельности ИТ предприятия, породившие комплекс моделей экспертной процедуры и комплекс моделей оптимизационной процедуры. Экспертная процедура обеспечивает оценку значимости ИТ проектов с использованием метода анализа иерархий. Комплекс моделей оптимизационной процедуры реализует метод линейного программирования, позволяющий в среднесрочной перспективе определить эффективную структуру стратегического портфеля ИТ проектов, обеспечивающего достижение стратегических целей ИТ фирмы. На основе построенного комплекса моделей разработана обобщенная алгоритмическая модель формирования стратегического портфеля ИТ проектов, которая может быть использована при создании информационной технологии стратегического планирования производственной деятельности ИТ предприятия в условиях динамической внешней среды.

Ключевые слова: комплекс моделей, оптимизационная процедура, экспертная процедура, портфель ИТ проектов, предприятие, информационная технология.

Introduction. Modern stage of Ukrainian economy external environment, increasing competition in domestic development is characterized by high dynamics of an and foreign markets, development of information

technologies tools and information technologies. All this actualizes strategic aspects of enterprise production activity management in the IT sector and requires a conscious selection of common development directions to achieve long-term corporate goals considering existing restrictions dictated by both the external and internal environment of the IT company. Depending on the level of instability of the external environment, there are four classes of enterprise management methods [1, 2, 3]: management methods based on execution control [3, 4]; extrapolation-based control methods [3, 4]; management methods based on the prediction of change (the future is partly predictable) [5, 6, 7]; management methods based on flexible urgent solutions (the future is unpredictable) [1, 3, 8, 9], which are the methods of strategic management that provide management of strategic capabilities of enterprise [3, 4, 5, 9]. Strategy formed by these methods determines the direction of development of the enterprise towards its target state while leaving the freedom of choice taking into account the changing situation in the external environment, current restrictions dictated by both the internal and external environment of the enterprise. Application of strategic management methods to formation of the portfolio of IT projects will allow to link portfolio projects with the achievement of the strategic goals of the IT company, provided that the limited resources for projects are effectively allocated [3, 10].

Therefore, the purpose of the work is to increase the profitability of the IT company by creating a set of models for the formation of a strategic portfolio of projects that ensures effective achievement of company strategic goals taking into account existing resource constraints.

Formulation of the problem. Achieving the competitive advantage of IT company is not only a consequence of the successful implementation of its portfolio of projects, but also the correct selection of morphology and projects portfolio structure that determine vector of IT company strategic development in a competitive external environment. Due to that, there arises the task to form an effective portfolio of IT company projects with an incremental style of behavior that can

create a finite set $\Pi = \overline{IT\Pi_S}, S = \overline{1, n}$ of IT projects (ITP). Further, ITP is understood as an activity of creating a unique software product in terms of time and resource constraints. It is assumed that for implementation of $IT\Pi \in \Pi$ at a given time interval the company has limited resources (labor, information, energy, natural, basic and circulating funds, etc.). All the necessary qualitative and quantitative information about past and current state of the IT company, its internal and external environment, and the results of its production activities is known. The task is to create a set of models that form such portfolio of IT company projects from $IT\Pi \in \Pi$ that at a given medium-term time interval, in conditions of available limited resources provides maximum allowable amount of profit with minimal risks for the company.

Set of models. A qualitative analysis of accumulated empirical evidence, generalization of IT company functioning experience are the source for determining promising directions of its strategic development. Therefore when developing a set of models for the formation of an effective portfolio of IT company projects (EPP) it is proposed to use qualitative and quantitative methods of modeling. Fig. 1 illustrates general scheme of formation of EPP, that contains an expert procedure designed to determine effective structure of the IT company projects portfolio.

As a theoretical basis for the expert procedure, it is proposed to use the hierarchy analysis method [11] which presumes decomposition of the problem of defining the project portfolio morphology into increasingly simpler components interaction of which is determined by the hierarchical model of impact of $IT\Pi \in \Pi$ on the increase of the IT company profit. At the first level of the hierarchy there is one vertex that determines focus of the problem (increase of profit).

The second level is determined by main objectives of the IT company: profit increase; cost reduction; risk reduction. The third level is determined by ITP groups which set directions of the IT company production activity. The lower level of the hierarchy is formed by $IT\Pi_S \in \Pi$.

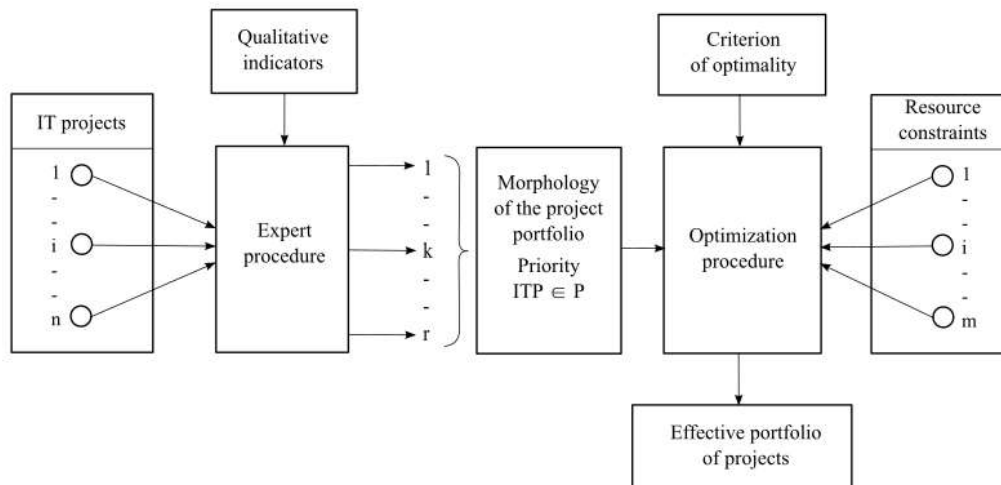


Fig. 1. General scheme for the formation of an effective portfolio of company IT projects

Based on the hierarchy for each of its maternal vertices an estimation of weight coefficients, that determine degree of its dependence on the vertices of the lower level that affect it, is given. For the formation of estimation a group that contains r experts from among IT company leading specialists is formed. Each expert with a number s , $s = \overline{1, r}$, forms a matrix of paired comparisons $A^s = (a_{ij}^s)$. The elements a_{ij} of the generalized matrix $A = (a_{ij})$ of pairwise congruencies are determined by the expression $a_{ij} = (\prod_{s=1}^r a_{ij}^s)^{\frac{1}{r}}$. The normalized eigenvector that corresponds to majorizing matrix root A determines local priorities of lower-level elements. Based on the local priorities of the hierarchy vertices and by using the hierarchical synthesis procedure of global priorities w_j , $w_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, of IT projects that make up composition of Π are found. The composition of $IT\Pi_s \in \Pi$ that determine the morphology of EPP are found by ranking $IT\Pi_j$ according to degree of decrease of their global priorities w_j and selection of the first $IT\Pi_{s_i}$ in Π_0 set in the resulting row, the sum of global priorities w_{s_i} is equal to $\alpha = 0,8 \pm \varepsilon$, ε – is admissible error.

Priorities w_i

$$IT\Pi_i \in \Pi_0 = \{IT\Pi_{s_i} : \sum_{i=1}^p w_{s_i} = 0,8 \pm \varepsilon\}, \quad (1)$$

where p – power of Π_0 , are found by rationing $w_i = w_{s_i}/\alpha$. Herewith $w_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^p w_i = 1$.

A set $M_1 = \{M_{1i}\}$ of models M_{1i} that provide the expert procedure contains:

M_{11} – algorithmic model of the hierarchical model formation;

M_{12} – algorithmic model of the formation for all of hierarchy maternal vertices of pairwise matrices A^s and generalized matrices A ;

M_{13} – algorithmic model for determining the local priorities of the vertices for the second, third and fourth hierarchy levels;

M_{14} – algorithmic model for determining global priorities $IT\Pi_s \in \Pi$;

M_{15} – algorithmic model for the formation of a set Π_0 of ITP projects that define the morphology of the EPP.

As a theoretical basis for creating the optimization procedure it is proposed to use linear programming method that allows in the medium-term perspective to define volumes of production of $IT\Pi_s \in \Pi_0$ that ensures achievement of IT company strategic objectives.

A general approach to solving the problem of volumetric planning assumes that the IT company is aware of the following information:

j – the project nomenclature number from Π_0 , $j = \overline{1, n}$;

n – power of Π_0 ;

b_i – volumes of limited resources (labor resources of various professional groups, fund for operating time of equipment for various purposes, raw materials and consumables, energy carriers, information resources, salary fund, etc.), $i = \overline{1, m}$;

standards for expenditure of resources for implementation and realization of the project;

profitability of $IT\Pi_j \in \Pi_0$;

requirement for the volume of projects realization.

Since the focus of the problem in determining the morphology of the EPP was to increase the profit of the IT so company linear form of the linear programming is the following:

$$L = \sum_{j=1}^n c_j w_j x_j \rightarrow \max, \quad (2)$$

where L – profit from the realization of projects;

c_j – profitability of project;

w_j – expected amount of risk determined by the probability that completed project will be paid by customer;

x_j – number of projects of j -th nomenclature.

Maximization of revenue (2) is carried out when the restrictions are met.

Limitations of project implementation volume

$$\sum_{j=1}^n s_j x_j \geq w, \quad (3)$$

where w – requirements for project implementation volume in the planned period.

Restriction on resources

$$\sum_{j=1}^m b_{ij} x_j \leq b_j, i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

where b_{ij} – norm of the expenditure of i -th resource for one project of j -th nomenclature.

Restrictions on production volumes of j -th nomenclature projects

$$\alpha_j \leq x_j \leq \beta_j, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

where value α_j is determined by the existing contractual obligations of IT company;

β_j – projects market opportunities of j -th nomenclature.

The mixed form of writing a linear programming objective makes it very difficult to assign an initial support plan when solving it by a finite method. Therefore, it is proposed to determine its solution by the M-method.

A set $M_2 = \{M_{2i}\}$ of models M_{2i} that provide the optimization procedure contains [12]:

M_{21} – algorithmic model of initial simplex tables formation that are required by M-method;

M_{22} – algorithmic model for determining solution of the objective (1-4);

M_{23} – algorithmic model for verifying reliability of the obtained solutions;

M_{24} – algorithmic model of conducting numerical experiments;

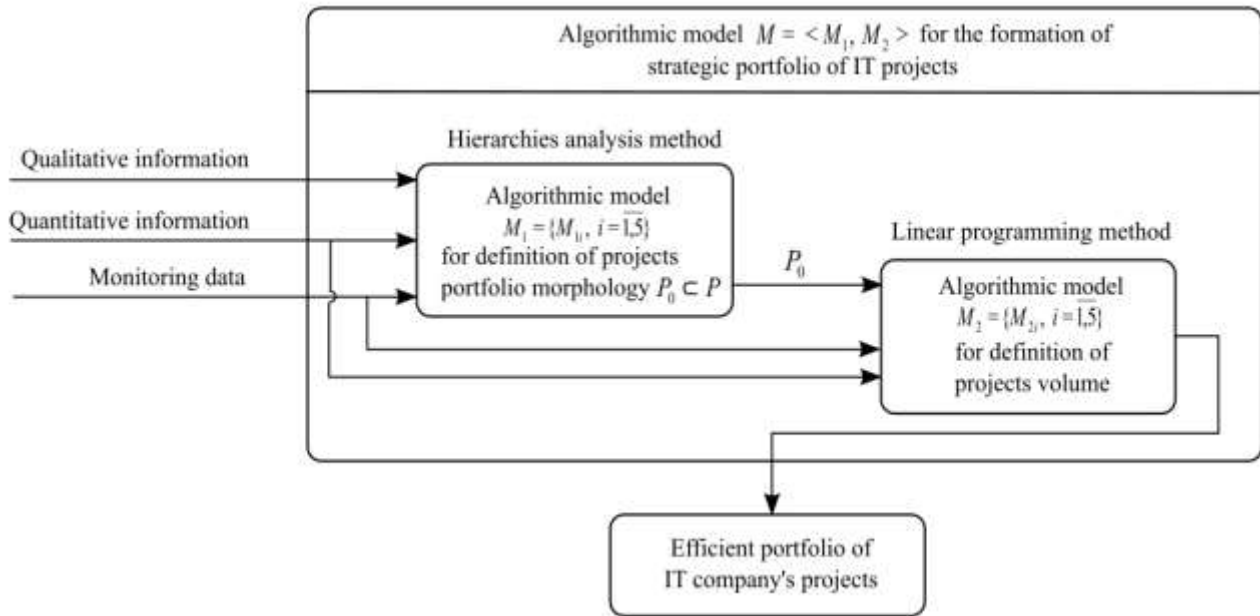


Fig. 2. Generalized structure of the algorithmic model for the formation of the IT company strategic portfolio of projects

M_{25} – algorithmic model for studying stability boundaries of the obtained volumetric optimal plan for implementation and realization of projects from Π_0 .

Fig. 2 illustrates a generalized structure of algorithmic model $M = \langle M_1 | M_2 \rangle$ for the formation of the strategic portfolio of projects.

Constructed algorithmic model prevents the possibility of many errors at a design stage of the program.

The constructed set of models $M = \{M_{1i}, M_{2i}, i = \overline{1,5}\}$ provides a clear formulation, purpose, content of individual parts of the program, allows paying considerable attention to ensuring the simplicity of software implementation structure of the algorithmic model, to significantly reduce costs, time expenditures for developing the software solution for the task of forming of the efficient portfolio of IT company projects, that operates in a competitive environment of IT industry.

Conclusions. The set of models of the expert procedure for determining the significance of IT projects was developed. The set of models of the optimization procedure for determining the effective structure of IT projects which determines the company strategic goals was elaborated as well. Besides, the algorithmic model for the formation of the company strategic portfolio of projects was worked out which can be used to create information technology for strategic planning of the company production activities.

References

1. Ансофф И. *Стратегическое управление*. СПб.: Наука, 1991. 612 с.
2. Ламбен Ж.-Ж. *Стратегический маркетинг. Европейская перспектива*. СПб.: Наука, 1996. 589 с.
3. Петров А. Н., Демидова Л. Г., Буренина Г. А. *Стратегический менеджмент* / ред. А. Н. Петров. СПб.: Питер, 2007. 496 с.

4. Зайцев Л. Г., Соколова М. И. *Стратегический менеджмент*. Москва: Экономист, 2007. 416 с.
5. Mazaraki A. A., Bosovskaya M. V. Theoretical and Methodological Foundations of Formation of the Integration Strategy of Enterprises. *Business Inform.* Kharkiv, Kharkiv National University of Economics, 2013. № 7. P. 299–308.
6. Angel I. Making Strategic Planning Work in Local Government. *Strategic Public Management Journal*. 2015. V. 1, № 1. pp. 40–55.
7. Barbaric M. Loncar D. Energy Management Strategies for Combined Heat and Electric Power Micro-Grid. *Thermal science*. 2016. V. 20, № 4. P. 1091–1103.
8. Todoran M. R. Using The Innovative Software Products In The Companies Management. *Risk in Contemporary Economy*. "Dunarea de Jos" University of Galati. 2015. V. 2, № 1. P. 215–222.
9. Onyeocha C. E., Khoury J., Geraghty J. Robustness Analysis of Pull Strategies in Multi-Product Systems. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2015. V. 8, № 4. P. 1125–1161.
10. Грей К. Ф., Ларсон Э. У. *Управление проектами: Практическое руководство*. Москва: Дело и Сервис, 2003. 528 с.
11. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 2007. 278 с.
12. Лисицкий В. Л. *Автоматизация операционных исследований на базе персональных ЭВМ*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. 103 с.

References (transliterated)

1. Ansoff H. Igor. *Strategic Management*. New York, Wiley, 1979. 236 p. (Rus. ed.: Ansoff I. *Strategicheskoye upravleniye*. SPb., Nauka Publ., 1991. 612 p.).
2. Lambin J.-J. *Strategic Marketing Management*. Blacklick, McGraw-Hill Companies, 1997. 467 p. (Rus. ed.: Lamben Zh.-Zh. *Strategicheskij marketing*. SPb., Nauka Publ., 1996. 589 p.).
3. Petrov A. N., Demidova L. G., Burenina G. A. *Strategicheskij menedzhment* [Strategic Management] / ed. A. N. Petrov. SPb., 2007. 496 p.
4. Zaytsev L. G., Sokolova M. I. *Strategicheskij menedzhment* [Strategic Management]. Moscow, Ekonomist, 2007. 416 p.
5. Mazaraki A. A., Bosovskaya M. V. Theoretical and Methodological Foundations of Formation of the Integration Strategy of Enterprises. *Business Inform.* Kharkiv, Kharkiv National University of Economics, 2013, no. 7, pp. 299–308.
6. Angel I. Making Strategic Planning Work in Local Government. *Strategic Public Management Journal*. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 40–55.

7. Barbaric M. Loncar D. Energy Management Strategies for Combined Heat and Electric Power Micro-Grid. *Thermal science*. 2016, vol. 20, no. 4, pp. 1091–1103.
8. Todoran M. R. Using The Innovative Software Products In The Companies Management. *Risk in Contemporary Economy*. "Dunarea de Jos" University of Galati. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 215–222.
9. Onyeocha C. E., Khoury J., Geraghty J. Robustness Analysis of Pull Strategies in Multi-Product Systems. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2015, vol. 8, no. 4, pp. 1125–1161.
10. Gray C. F., Larsen E. W. *Project Management. The managerial process*. New York, McGraw-Hill International Editions, 2000. 512 p. (Rus. ed.: Gray C. F., Larsen E. W. *Upravleniye proyektami: Prakticheskoye rukovodstvo*. Moscow, Delo i Servis, 2003. 528 p.).
11. Thomas L. Saaty *Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Belmont, Wadsworth, 1982. 291 p. (Rus. ed.: Saaty T. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhii*. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 2007. 278 p.).
12. Lisitsky V. L., *Avtomatizatsiya operatsionnykh issledovaniy na baze personal'nykh EVM* [Automation of operational research on the basis of personal computers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2006. 103 p.

Received 06.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисицький Василь Лаврентійович (Лисицкий Василий Лаврентьевич, Lysytskyi Vasyl Lavrentiiovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри ПІТУ; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6073-0844>; e-mail: naukaint2016@gmail.com

Орленко Данило Юрійович (Орленко Даниил Юрьевич, Orlenko Danylo Yuriiovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7919-114X>; e-mail: frest742@gmail.com

H. V. VIETROVA, V. O. HUZHVA

ANALYSIS OF THE MARKOWITZ'S AND TOBIN'S MODELS FOR SECURITIES PORTFOLIO CONSTRUCTION

The conclusions about the strata of society, various parties are supported by, have been made. The question arises of revising and improving the ways of forming the investment portfolio, since the degree of influence of macroeconomic indicators on the stock market behavior changes. The stock market is one of the key elements of the financial system of any state. The essence of the securities portfolio, the main task and the main objective of portfolio investment, the nature and methods of forming the securities portfolio in the conditions of instability of the Ukrainian stock market are considered. It describes the process of forming a securities portfolio, which is divided into five stages: determining investment objectives and priorities, conducting an analysis of securities, creating a portfolio and choosing management tactics, revising a portfolio and evaluating portfolio performance. On the basis of Markowitz's model and Tobin's model are developed algorithmic, informational and software. The applied capabilities of portfolio investment models are explored, which realize the main idea of Markowitz to form an optimal securities portfolio, while at the same time having fundamental differences. And the main difference Tobin's model, which includes a certain risk-free asset, along with risky securities. An optimal securities portfolio is being built using ten risky stocks of various sectoral activities of Ukrainian enterprises using the Markowitz model and using risk-free assets (government corporate bonds) for the Tobin model. Also the composition, profitability and risk of the optimal portfolio in the Ukrainian stock market are determined. In addition, a graph of profitability and risk dependencies is constructed, where each point of the chart is a certain portfolio with a certain number of investments in the stocks of listed companies. The conclusion is made on the results obtained, focusing on their difference depending on the choice of the model of portfolio formation.

Keywords: securities, investment portfolio, portfolio formation, risk, profitability, Markowitz model, Tobin model.

Г. В. ВЕТРОВА, В. О. ГУЖВА

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАРКОВИЦА ТА ТОБІНА ПОБУДОВИ ПОРТФЕЛЯ ЦІННИХ ПАПЕРІВ

Останнім часом виникає питання перегляду і вдосконалення способів формування інвестиційного портфеля, оскільки змінюється ступінь впливу макроекономічних індикаторів на поведінку фондового ринку. Фондовий ринок є одним з ключових елементів фінансової системи будь-якої держави. Розглядаються сутність портфеля цінних паперів, основне завдання і головна мета портфельного інвестування, сутність і методи формування портфеля цінних паперів в умовах нестабільності українського фондового ринку. Описується процес формування портфеля цінних паперів, який розділений на п'ять етапів: визначення інвестиційних цілей та пріоритетів, проведення аналізу цінних паперів, створення портфеля і вибору тактики управління, ревізія портфеля і оцінка ефективності портфеля. Розробляється алгоритмічне, інформаційне та програмне забезпечення на основі моделі Марковича і моделі Тобіна. Обговорюються прикладні можливості моделей портфельного інвестування, які реалізуючи основну ідею Марковича щодо формування оптимального портфеля цінних паперів, в той же час мають принципові відмінності. І розглядається головна відмінність моделі Тобіна, яка включає в дослідження поряд з ризиковими цінними паперами певний безризиковий актив. Будеться оптимальний портфель цінних паперів з використанням десяти ризикових акцій різних галузевих сфер діяльності українських підприємств за моделлю Марковича і з використанням безризикових активів (державних корпоративних облігацій) за моделлю Тобіна. Визначається склад, прибутковість і ризик оптимального портфеля на українському фондовому ринку. Крім того, будується графік залежностей прибутковості та ризику, де кожна точка графіка є певний портфель з певною кількістю вкладень в акції наведених компаній. Робиться висновок за отриманими результатами, акцентуючись на їх відмінність в залежності від вибору моделі формування портфеля.

Ключові слова: цінні папери, інвестиційний портфель, формування портфеля, ризик, прибутковість, модель Марковича, модель Тобіна.

Г. В. ВЕТРОВА, В. А. ГУЖВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАРКОВИЦА И ТОБИНА ПОСТРОЕНИЯ ПОРТФЕЛЯ ЦЕННЫХ БУМАГ

В последнее время возникает вопрос пересмотра и совершенствования способов формирования инвестиционного портфеля, поскольку изменяется степень воздействия макроекономических индикаторов на поведение фондового рынка. Фондовый рынок является одним из ключевых элементов финансовой системы любого государства. Рассматриваются сущность портфеля ценных бумаг, основная задача и главная цель портфельного инвестирования, сущность и методы формирования портфеля ценных бумаг в условиях нестабильности украинского фондового рынка. Описывается процесс формирования портфеля ценных бумаг, который разделен на пять этапов: определение инвестиционных целей и приоритетов, проведение анализа ценных бумаг, создание портфеля и выбора тактики управления, ревізія портфеля и оценка эффективности портфеля. Разрабатывается алгоритмическое, информационное и программное обеспечение на основе модели Марковича и модели Тобина. Обсуждаются прикладные возможности моделей портфельного инвестирования, которые реализуют основную идею Марковича по формированию оптимального портфеля ценных бумаг, в то же время имеют принципиальные отличия. И рассматривается главное отличие модели Тобина, которая включает в исследование наряду с рисковыми ценными бумагами определённый безрисковый актив. Строится оптимальный портфель ценных бумаг с использованием десяти рискованных акций различных отраслевых сфер деятельности украинских предприятий по модели Марковича и с использованием безрисковых активов (государственных корпоративных облигаций) по модели Тобина. Определяется состав, доходность и риск оптимального портфеля на украинском фондовом рынке. Кроме того, строится график зависимостей доходности и риска, где каждая точка графика есть некоторый портфель с определённым количеством вложений в акции приведенных компаний. Делается вывод по полученным результатам, акцентируя на их отличие в зависимости от выбора модели формирования портфеля.

Ключевые слова: ценные бумаги, инвестиционный портфель, формирование портфеля, риск, доходность, модель Марковича, модель Тобина.

Introduction. The last global financial crisis made investors, which required a revision of the attitude towards certain adjustments to the investment policy of most the formation of investment portfolios. At the same time,

the previously dominant investment strategies of most investors aimed at international securities markets changed to the opposite, facing domestic investment sources. In this regard, the issues of improving investment strategies become important, allowing not only to optimize them, but also to make timely adjustments depending on the influence of various factors.

The main objective of portfolio investment is to give to set of securities such investment characteristics, which are unattainable from a position of a single security [1]. The portfolio of securities is that tool by means of which the investor provides the required stability of income at minimal risk [2]. The main goal in the formation of the portfolio is to achieve the most optimal combination between risk and income for the investor. The portfolio must include elements of different risk and profit. Moreover, depending on the intentions of the investor, the share of multi-purpose elements may vary. This task arises from the general principle that operates in the investment market: the higher the potential risk borne by the instrument, the higher the potential income it should have [3]. As the portfolio represents a set of various securities, an investment decision is equivalent to choosing the optimal portfolio from a set of possible portfolios. This problem is called the problem of choosing an investment portfolio [4].

The process of forming a securities portfolio can be divided into several stages [5]:

1) Definition of investment goals and priorities.

From the point of view of the formation of the securities portfolio, the goals can be divided into categories:

- investment security, which means protecting investments from market shocks and the stability of receiving income;
- profitability of investments;
- increase in the cost of investments.

2) Conducting analysis of securities.

The analysis of securities is the application of fundamental and technical analysis. Fundamental analysis is a study of the overall economic situation, the financial situation of individual companies, and the state of industries. Technical analysis is based on the study of price movements for financial instruments, the basis of which are the market movement charts for previous periods of time, market statistics, data on changes in stock market rates and forecasts of future price movements.

In addition, the formation of the securities market is influenced by the rating of the company and the securities, which are selected on the basis of stock indices. The result of this stage is a list of securities, the most profitable and least risky, for inclusion in the portfolio in a certain period of time.

3) Portfolio formation.

At this stage, investment assets are selected on the basis of the analysis carried out and taking into account the specific goals of the investor. An investor's portfolio may consist of securities (stocks) of one company if the investor's goal is to become the owner of the company and at the same time receive dividends. If the goal is to

earn on speculation from securities transactions, then the investor forms his portfolio of securities that can be earned. The task of the investor in this case will be to acquire undervalued securities at a certain moment, whose market price at the time of purchase is lower than the true price and to get rid of overvalued securities in time and thereby receive a certain profit in the future [6]. It is very important to apply capital diversification in the formation of a securities portfolio. The more stocks of various companies in the investor's portfolio, the more chances the investor has to make a profit. Therefore, the most common is the so-called "diversified portfolio", that is, a portfolio with a variety of securities. In other words, a portfolio consisting of stocks, bonds and other securities of diverse companies ensures the stability of obtaining a positive result [7].

4) Portfolio audit.

The securities portfolio should be periodically reviewed in accordance with the existing situation in the economy and the goals of the investor.

5) Portfolio performance evaluation.

The last stage of securities portfolio management implies a periodic assessment of the portfolio's efficiency, taking into account the income gained and the risk that arose or could arise during the management period.

Analysis of securities portfolio formation methods. At formation of the portfolio of securities a large number of models and methods from which it is possible to allocate is used:

- Michael O'Higgins and Gardner's method;
- H. Markowitz's model;
- Model Sharp;
- Tobin's model.

In article two models are considered: Markowitz's model and Tobin's model. Markowitz's model [8] is the cornerstone of the theory of the investment portfolio. This model allows you to define indicators characterizing the amount of investment and risk, and makes it possible to compare various alternative capital investment options among themselves.

Cumulative portfolio risk, H. Markowitz divided into two parts. To the first part, he referred to the systematic risk, which is caused by the economic, psychological and political situation in the country, which simultaneously affects all securities equally.

The second is the specific risk that each specific security has, which can be eliminated by managing the securities portfolio. Dividing the risk into components gives the investor the opportunity to analyze securities from all sides and to determine their strengths and weaknesses in optimizing the portfolio.

The critical line method developed by H. Markowitz made it possible to determine the range of acceptable portfolios and to distinguish invalid and effective portfolios.

Effective portfolios are portfolios that contain minimal risk for a given income or bring the maximum possible income for a given level of risk that an investor can take [9].

The theory of H. Markowitz allows investors to measure the level of risk and determine effective portfolios, but it does not specify the relationship between the level of risk and the required profit.

The form of the mathematical model of the direct task of H. Markowitz at which the portfolio risk does not exceed the specified value σ_p :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_i r_i \rightarrow \max \\ \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} < \sigma_p \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ x_i \geq 0 \end{array} \right.$$

The form of the mathematical model of the inverse task of H. Markowitz, at which the portfolio profit is not lower than the specified value r_p :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n x_i r_i > r_p \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ x_i \geq 0 \end{array} \right.$$

where portfolio profit is:

$$r_p = \sum_{i=1}^n x_i r_i,$$

where x_i – the share of the i -th financial asset in the portfolio;

n – the number of securities that make the investment portfolio;

r_i – average profitability (mathematical expectation) of the i -th financial asset;

r_p – expected value of the portfolio profit.

The average profit of the i -th financial asset is the formula:

$$r_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T r_{it},$$

where T – the period for which the profit of the security is considered;

r_{it} – profit of the security in a particular month t .

The risk of the securities portfolio is:

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j},$$

where σ_p – investment portfolio risk level;

x_i, x_j – the share of the i -th and j -th financial asset in the portfolio;

σ_i, σ_j – standard deviation of returns of the i -th and j -th securities;

ρ_{ij} – coefficient of correlation of i -th and j -th securities profits.

The standard deviation of the profit of a security is calculated by the formula:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (r_{it} - r_i)^2}.$$

The correlation coefficient of the securities is found by the formula:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$$

where cov_{ij} – the covariance of the i -th and j -th securities yields, which is calculated by the formula:

$$\text{cov}_{ij} = \frac{\sum (r_{it} - r_i)(r_{jt} - r_j)}{T}.$$

The problem of using the Markowitz model in the practical financial activities of enterprises for the selection of an optimal investment portfolio is due to the following factors:

- the model does not take into account the time factor, in particular, it gives an answer to the question regarding the number and type of securities at the expense of which an investment portfolio should be formed, but ignores the question of the most optimal time to acquire and sell assets;
- the complexity of collecting information and statistical calculations on which investment decisions are based;
- the model does not take into account the methodology of fundamental and technical analysis of stocks.

The main conclusion that follows from the concept of Markowitz is that within the framework of the strategy of minimizing investment risks, one should select an investment portfolio in which priority is given not so much to the securities, the risk level of each of which is minimal, but the combination of assets with minimal correlation between their levels of profitability.

Such a strategy is more pragmatic than choosing the most profitable or least risky financial assets. Moreover, at a given level of profitability, the risk will be the smaller, the greater the level of diversification of the investment portfolio [10].

The most successful attempts, actual and in modern conditions, are the models of J. Tobin and W. Sharp, developing the theory of H. Markowitz. In the model of H. Markowitz, the securities portfolio was formed exclusively of risky assets. This shortcoming was overcome in the Tobin model, which includes, along with risky securities, a certain risk-free asset in the study. He focused on the behavior of an individual investor who invests money in securities, guided by his own ideas about the optimal ratio of profitability and risk.

The model of J. Tobin is based on the assumption that, in addition to risky portfolio investments, there are risk-free

securities on the stock market (the risk value of which tends to zero), which allowed it to significantly simplify the task of forming an optimal portfolio.

These risk-free assets J. Tobin attributed bonds as securities, income and return amounts that are fixed by the terms of the loan. The second assumption that underlies the J. Tobin model is that the price of bonds is not accidental, and is dictated by market conditions. The assets, the risk level of which is high and must be taken into account when choosing the optimal investment portfolio, J. Tobin attributed the stocks.

Proceeding from this, J. Tobin made an obvious assumption that when individual assets are included in their portfolio, an investor should be guided by the rule that the non-random price of risky securities (stocks) r_i should be higher than the non-random price of risk-free securities (bonds) r_0 , that is an indispensable condition of the optimal investment portfolio is inequality performance: $r_i > r_0$.

It should be emphasized that in the model of J. Tobin, the solution to the problem of portfolio optimization does not depend on the structure of the risk part of the assets; when it changes, it is enough just to recalculate r_i with each change in the structure of the portfolio. The optimization problem is solved by the inequality $r_i > r_0$, where the risk part of the portfolio is considered as one average stock.

Mathematically, the task of optimizing the investment portfolio in the J. Tobin model is a linear objective function with quadratic nonlinear constraints. It can be solved both to minimize the risk at a given level of profitability and to maximize profitability at a given level of risk [11].

The economic-mathematical model of the problem of forming a portfolio with a maximum profit is as follows:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_0 x_0 + \sum_{i=1}^n r_i x_i \rightarrow \max \\ \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sigma_i^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} < \sigma_p \\ x_0 + \sum_{i=1}^n x_i = 1 \end{array} \right.$$

Economic-mathematical model of portfolio formation with minimal risk:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \rightarrow \min \\ r_0 x_0 + \sum_{i=1}^n r_i x_i \geq r_p \\ x_0 + \sum_{i=1}^n x_i = 1 \end{array} \right. ,$$

where r_0 – expected value of risk-free asset profit;

x_0 – share of a risk-free asset in a portfolio.

The values of input variables and coefficients discussed earlier.

The Tobin model is simpler than the H. Markowitz model, it allowed us to more clearly formalize the notion of profitability and risk. However, it did not answer the question about the effect of individual assets on the level of risk and return on the investment portfolio.

Consider the assets of companies in various sectoral areas of activity, we estimate their profitability and risk indicators, and by forming investment portfolios we reduce the degree of risk to a possible limit.

Purposes and research problems. The purpose of this work is the implementation of software for solving the problem of forming a portfolio of securities.

To achieve this goal, the article solved the following tasks:

- analysis of common models for the formation of a securities portfolio on the Ukrainian stock market;
- selection of suitable models for the formation of the investment portfolio;
- developed algorithmic software and mathematical for the implementation of the selected methods;
- developed information and software for the task of forming a portfolio of securities.

The subject of the research is the process of forming an investment portfolio of high-risk assets based on the Markowitz model, and high-risk and risk-free assets using the Tobin model, taking into account the specifics of the Ukrainian stock market.

The object of the research is stock quotes in the period from 11/06/2016 to 11/06/2017. Quotations of securities were taken from a source [12]. Depending on stock price fluctuations, we calculate average rates of return, variances and risk indicators for each of the companies under consideration.

On the basis of the Markowitz and Tobin models for the task of building a minimum risk portfolio by diversifying securities, a software product was developed, which was implemented in the Microsoft Visual Studio 2012 development environment, to write the program code, the C # programming language was used. For the formation of portfolios of securities were used securities presented in table 1.

Table 1 – Securities

Company	Ticker	Profit	Risk
Ukrnafta	UNAF	3,02 %	9,87 %
ASTARTA HOLDING	AST	-0,15 %	8,89 %
KSG AGRO	KSG	0,97 %	14,97 %
Ovostar Union	OVO	2,23 %	3,93 %
Motor Sich	MSICH	4,82 %	6,89 %
Raiffaizen Bank Aval	BAVL	8,78 %	15,32 %
Tsentrenerho	CEEN	0,96 %	6,13 %
Dniproblerho	DNON	24,99 %	44,12 %
Ukrtelekom	UTLM	1,01 %	9,18 %
Donbasenerho	DOEN	4,75 %	9,94 %
Government corporate bonds		1,458 %	

Tables 2 and 3 show the results of solving the problem of forming a securities portfolio using these models. The results are obtained using implemented information, algorithmic and software.

Table 2 – The calculation results for the Markowitz's model

Company	Share of securities in the portfolio	
Ukrnafta	4,86 %	
ASTARTA HOLDING	9,53 %	
KSG AGRO	0 %	
Ovostar Union	19,43 %	
Motor Sich	11,27 %	
Raiffaizen Bank Aval	06,13 %	
Tsentrenerho	21,06 %	
Dniproblerho	3,58 %	
Ukrtelekom	24,12 %	
Donbasenerho	0 %	
Portfolio performance	Profit	3 %
	Risk	0,01689 %

Table 3 – The calculation results for the Tobin's model

Company	Share of securities in the portfolio	
Ukrnafta	0 %	
ASTARTA HOLDING	2,19 %	
KSG AGRO	0 %	
Ovostar Union	10,59 %	
Motor Sich	14,67 %	
Raiffaizen Bank Aval	6,71 %	
Tsentrenerho	15,56 %	
Dniproblerho	2,79 %	
Ukrtelekom	13,47 %	
Donbasenerho	0 %	
Government corporate bonds	34,05 %	
Portfolio performance	Profit	3 %
	Risk	0,01084 %

The result of the calculations are the graphs presented in fig. 1 and fig. 2, which show the dependence of profitability and risk.

Each point of the chart has a certain portfolio with a certain number of investments in the shares of the listed companies.

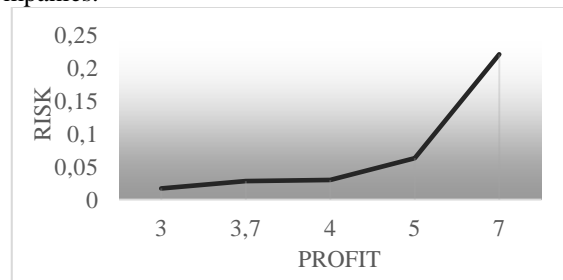


Fig. 1. The dependence of profitability and risk on the Markowitz's model

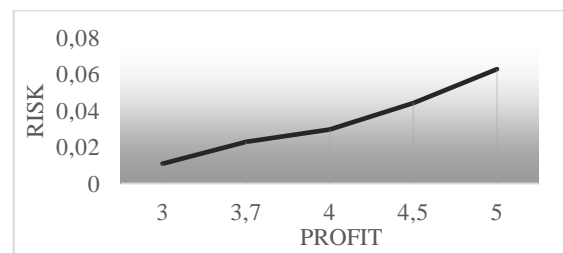


Fig. 2. The dependence of profitability and risk on the Tobin's model

Forming portfolios with different income level it is possible to make a conclusion:

1 Minimum acceptable level of income according to the Markowitz's model of 3 %, on Tobin's model of 1,5 %.

2 The difference of results is proved by the fact that unlike the Markowitz's model, Tobin's model considers also risk-free assets.

Besides, these models have various formula of calculation of risk of the investment portfolio.

Nevertheless, the presence of a huge number of factors directly or indirectly affecting the dynamics of listed issuers does not allow one to unambiguously predict and reduce to zero the risk of losing investments, but it is possible to reduce it to a minimum with optimal yield.

Conclusion. In this research work, on the basis of the developed algorithmic and information support software was created, with the help of which the securities portfolio was formed taking into account the specifics of the Ukrainian stock market.

References

- Лубинец С. С., Никонова Я. И. Формирование инвестиционного портфеля физическими лицами. *Студенческий научный форум*, 2015. URL: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015014172/> (access date: 07.09.2018).
- Гридасов В. М. *Инвестирование*. Киев: ЦУЛ, 2004. 164 с.
- Боровкова В. А. *Рынок ценных бумаг*. СПб: Питер, 2007. 272 с.
- Тимирова А. Н. *Свойства модели Марковица при задании параметров средствами теории нечетких множеств*. URL: [http://www.intsys.msu.ru/magazine/archive/v16\(1-4\)/timirova-203-214.pdf](http://www.intsys.msu.ru/magazine/archive/v16(1-4)/timirova-203-214.pdf) (access date: 15.09.2018).
- Щербаченко А. С. Особенности выбора метода формирования инвестиционного портфеля в условиях нестабильности

- фондового рынка. *Интернет-журнал «Науковедение»*, 2014, вып. 1. С. 11–18.
6. Зверев В. А., Зверева А. В., Евсюков С.Г. *Рынок ценных бумаг*. Москва: Дашков и К, 2016. 496 с.
 7. Грищенко Ю. И. Портфель ценных бумаг: оценка доходности и риска. *Справочник экономиста*, 2009, вып. 9. С. 14–20.
 8. Шапкин А. С. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций. Москва: Дашков и К, 2003. 544 с.
 9. Боди З., Кейн А., Маркус А. *Принципы инвестиций*. Москва: Вильямс, 2002. 984 с.
 10. Терещенко А. О. Финансовая деятельность субъектов хозяйствования. Киев: КНЭУ. 2003. 554 с.
 11. Филиппов К. В. Существующие подходы к оптимизации современных инвестиционных портфелей ценных бумаг. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2008, вып. 2. С. 270–278.
 12. *Котировки акций online*. URL: <http://investfunds.ua/markets/stocks/> (дата обращения 11.10.2018).

References (transliterated)

1. Lubinets S. S., Nikonova Ya. I. Formirovanie investitsionnogo portfelya fizicheskimi litsami [Formation of the investment portfolio by individuals]. *Studencheskiy nauchnyy forum*, 2015. Available at: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015014172/> (accessed: 07.09.2018).
2. Gridasov V. M. *Investirovanie* [Investing]. Kiev, TsUL Publ., 2004. 164 p.
3. Borovkova V. A. *Ryнок tsennyih bumag* [Securities market]. SPb, Piter Publ., 2007. 272 p.
4. Timirova A. N. *Svoystva modeli Markovitsa pri zadanii parametrov sredstvami teorii nechetkih mnozhestv* [Markovits model properties when specifying parameters using the fuzzy set theory]. Available at: [http://www.intsys.msu.ru/magazine/archive/v16\(1-4\)/timirova-203-214.pdf](http://www.intsys.msu.ru/magazine/archive/v16(1-4)/timirova-203-214.pdf) (accessed: 15.09.2018).
5. Scherbachenko A. S. Osobennosti vyibora metoda formirovaniya investitsionnogo portfelya v usloviyah nestabilnosti fondovogo ryinka [Features of the choice of the method of forming the investment portfolio in conditions of instability of the stock market]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2014, vol. 1, pp. 11–18.
6. Zverev V. A., Zvereva A. V., Evsyukov S.G. *Ryнок tsennyih bumag* [Stocks and bonds market]. Moskva, Dashkov i K Publ., 2016. 496 p.
7. Grischenko Yu. I. Portfel tsennyih bumag: otsenka dohodnosti i riska [Portfolio of securities: an assessment of profitability and risk]. *Spravochnik ekonomista*, 2009, issue 9, pp. 14–20.
8. Shapkin A. S. *Ekonomicheskie i finansovye riski. Otsenka, upravlenie, portfel investitsiy* [Economic and financial risks. Evaluation, management, investment portfolio]. Moskva, Dashkov i K Publ., 2003. 544 p.
9. Bodi Z., Keyn A., Markus A. *Printsipy investitsiy* [Principles of investments]. Moskva, Williams Publ., 2002. 984 p.
10. Tereschenko A. O. *Finansovaya deyatel'nost' sub'ektov hoz'yaystvovaniya* [Financial activities of business entities]. Kiev, KNEU Publ., 2003. 554 p.
11. Filippov K. V. Suschestvuyushchie podhody k optimizatsii sovremennyih investitsionnyih portfelye tsennyih bumag [Existing approaches to the optimization of modern investment securities portfolios]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, issue 2, pp. 270–278.
12. *Kotirovki aktsiy online* [Stock quotes online]. Available at: <http://investfunds.ua/markets/stocks/> (accessed 11.10.2018)

Received 13.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ветрова Галина Вікторівна (Ветрова Галина Викторовна, Vietrova Halyna Viktorivna) – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6839-7049>; e-mail: vetrova33b@gmail.com

Гужва Віктор Олексійович (Гужва Виктор Алексеевич, Huzhva Viktor Oleksiiovych) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6832-4480>; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

А. С. ДОВБИШ, В. І. ЗИМОВЕЦЬ, М. В. БІБИК

ОПТИМІЗАЦІЯ ІЄРАРХІЧНОЇ СТРУКТУРИ ДАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНОЇ МАШИНИ

Розглядається метод інформаційно-екстремального машинного навчання системи функціонального діагностування технічного стану складної машини з оптимізацією ієрархічної структури вхідних даних. Показано, що на функціональну ефективність машинного навчання системи функціонального діагностування суттєво впливає розміщення в ієрархічній структурі класів розпізнавання, які характеризують технічний стан машини та її вузлів. При цьому для кожної страти ієрархічної структури накладаються обмеження на кількість класів розпізнавання, що дозволяє зменшити ступінь їх перетину в просторі діагностичних ознак. Оптимізація ієрархічної структури здійснюється в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання системи функціонального діагностування, що дозволяє максимізувати інформаційну спроможність системи. Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання розглядається модифікована інформаційна міра Кульбака, яка є функціоналом точнісних характеристик діагностичних рішень. При цьому алгоритм машинного навчання представляв собою багаточисельну ітераційну процедуру пошуку максимального глобального значення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання в робочій (допустимій) області визначення його функції. В результаті для страт всіх ярусів ієрархічної структури сформовано алфавіти класів розпізнавання, які забезпечили максимальну функціональну ефективність машинного навчання. За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання побудовано вирішальні правила, які дозволяють приймати діагностичні рішення в реальному темпі часу. Крім того, вирішальні правила, побудовані в рамках геометричного підходу, є практично інваріантними до багатовимірності вхідних даних, що є їх суттєвою перевагою перед штучними нейронними мережами. Як приклад реалізації запропонованого методу розглядалося машинне навчання системи функціонального діагностування шахтної підйомної машини з оптимізацією структури вхідних даних.

Ключові слова: система функціонального діагностування, технічний стан, інформаційно-екстремальне машинне навчання.

А. С. ДОВБИШ, В. И. ЗИМОВЕЦ, М. В. БИБИК

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ МАШИН

Рассматривается метод информационно-экстремального машинного обучения системы функционального диагностирования технического состояния сложной машины. Процесс проходит с оптимизацией иерархической структуры данных. Показано, что на функциональную эффективность машинного обучения системы функционального диагностирования существенное влияние оказывает расположение в иерархической структуре классов распознавания, характеризующих техническое состояние машины и её узлов. При этом для каждой страты рассматриваемой иерархической структуры накладывается ограничение на количество классов распознавания, что позволяет уменьшить степень их пересечения в пространстве диагностических признаков. Оптимизация иерархической структуры осуществлялась в процессе информационно-экстремального машинного обучения системы функционального диагностирования, позволяющего максимизировать информационную способность системы. В качестве критерия оптимизации параметров машинного обучения рассматривалась модифицированная информационная мера Кульбака, являющаяся функционалом точностных характеристик диагностических решений. При этом алгоритм машинного обучения представлял многоциклическую итерационную процедуру поиска максимального глобального значения информационного критерия оптимизации параметров обучения в рабочей (допустимой) области определения его функции. По полученным в процессе машинного обучения оптимальным геометрическим параметрам контейнеров классов распознавания построены решающие правила, позволяющие принимать диагностические решения в реальном темпе времени. В качестве примера реализации метода оптимизации структуры входных данных рассматривалось машинное обучение системы функционального диагностирования шахтной подъёмной машины. В результате для страт всех ярусов иерархической структуры сформированы алфавиты классов распознавания, обеспечивающие максимальную функциональную эффективность машинного обучения.

Ключевые слова: система функционального диагностирования, техническое состояние, информационно-экстремальное машинное обучение.

A. S. DOVBYSH, V. I. ZIMOVETS, M. V. BIBYK

OPTIMIZATION OF HIERARCHICAL DATA STRUCTURE OF INTELLIGENT SYSTEM OF FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF TECHNICAL CONDITION OF COMPLEX MACHINES

The conclusions about the strata of society, various parties are supported by, have been made. The method of information-extreme machine learning of the system of functional diagnosis of the technical state of a complex machine with the optimization of the hierarchical data structure is considered. It is shown that the functional efficiency of machine learning of the system of functional diagnosis is significantly influenced by the location in the hierarchical structure of the recognition classes characterizing the technical state of the machine and its nodes. At the same time, for each level of the hierarchical structure under consideration, a restriction on the number of recognition classes is imposed, which makes it possible to reduce the degree of their intersection in the space of diagnostic features. Optimization of the hierarchical structure was carried out in the process of information-extreme machine learning of the system of functional diagnosis, which allows to maximize the information capacity of the system. As a criterion for optimizing the parameters of machine learning, we considered a modified information measure of Kulbak, which is a functional of the accurate characteristics of diagnostic solutions. In this case, the algorithm of machine learning represented a multi-cycle iterative procedure of finding the maximum global value of the information criterion for optimizing learning parameters in the working (permissible) domain of determining its function. Based on the optimal geometric parameters of recognition class containers obtained in the course of machine learning, decision rules have been constructed that allow making diagnostic decisions in a real time. As an example of the implementation of the method of optimization the structure of input data, the machine learning of the system for the functional diagnosis of a mine hoist was considered. As a result, alphabets of recognition classes have been created for strata of all tiers of the hierarchical structure, providing the maximum functional efficiency of machine learning.

Keywords: system of functional diagnostics, technical condition, information-extreme machine learning.

Вступ. Одним із шляхів підвищення надійності та безпечної роботи автоматизованих систем керування складними машинами є прогнозування моменту виходу діагностичних ознак за нормовані допуски. Особливо актуальною така задача є для систем і машин критичного призначення, відмова яких може призвести до техногенних катастроф з важкими наслідками. До цього класу відносяться системи і обладнання в гірничодобувній промисловості, серед яких важливе місце займають багатоканатні шахтні підйомні машини (ШПМ) [1]. При цьому до рівня безпечної роботи ШПМ висуваються вимоги як і до безпеки бортового обладнання літальних апаратів. Наприклад, однією з таких вимог є наявність для ШПМ “чорної скриньки”, яка зберігає архівні дані, отримані на всіх технологічних циклах функціонування автоматизованої системи керування. Але розшифровка “чорної скриньки” є довготривалою складною процедурою, яка відбувається, як правило, під час планових профілактичних робіт або аналізу наслідків аварії.

Сучасним підходом до підвищення оперативності оцінки технічного стану вузлів машини, є застосування системи функціонального діагностування, інтегрованої в автоматизовану систему керування ШПМ [2, 3]. При цьому система функціонального діагностування повинна виконувати прогностичні функції, пов'язані з оцінкою поточного ресурсу технологічного обладнання і тенденції виходу діагностичних ознак за межі нормованих допусків

Подальший розвиток теорії інформаційного синтезу систем функціонального діагностування складних систем і машин пов'язаний з подоланням ряду науково-методологічних ускладнень, обумовлених такими основними причинами:

- 1) довільні початкові умови технологічного процесу;
- 2) суттєвий перетин в просторі діагностичних ознак класів розпізнавання, які характеризують відповідні технічні стани обладнання;
- 3) великі обсяги даних, що аналізуються.

Традиційні підходи до вирішення проблеми функціонального діагностування, засновані на методах математичної логіки, математичної статистики або імітаційного моделюванні, не дозволяють будувати адекватні діагностичні моделі складних об'єктів через обмеженість часових, обчислювальних і матеріальних ресурсів. Тому в останні десятиліття спостерігається підвищення наукового і практичного інтересу до застосування інформаційних технологій інтелектуального аналізу даних [4–6].

Аналіз методів прогнозування технічного стану обладнання та механізмів показує що їх можна розділити на аналітичні [7], імовірнісні [8] і методи прогностичної класифікації [9]. Метод аналітичного прогнозування, як правило, застосовується, коли відома аналітична залежність функції зміни діагностичного параметру в часі. При побудові довгострокових прогнозів зміни параметрів, що

характеризують технічний стан об'єктів діагностування, найбільшого поширення набули методи статистичної екстраполяції даних експерименту [8]. Основним недоліком цього підходу є необхідність накопичення великих обсягів даних за сталих умов, що як правило на практиці не виконується. В результаті прогностичної класифікації контрольований об'єкт відносять до того чи іншого параметричного класу технічного стану, який встановлюють попередньо за критерієм схожості і приймають за еталон [9]. Основна перевага методів прогностичної класифікації полягає в тому, що вони є адаптивними до зміни початкових умов технологічного процесу. Крім того, прогнозування можна починати з моменту здійснення одноразового контролю обладнання, яке функціонує в робочому режимі. Але при цьому необхідною умовою є наявність вирішальних правил, побудованих на етапі машинного навчання системи функціонального діагностування.

Таким чином, перспективним шляхом подальшого розвитку основ проектування систем функціонального діагностування складних машин і систем є застосування ідей і методів машинного навчання та розпізнавання образів [10]. При цьому найбільшого поширення набули методи інформаційного синтезу систем функціонального діагностування, побудовані на основі штучних нейронних мереж [11, 12]. Основним недоліком такого підходу є чутливість штучних нейронних мереж до багатовимірності простору діагностичних ознак і алфавіту класів розпізнавання. Крім того, оскільки класи розпізнавання на практиці перетинаються в просторі діагностичних ознак, то в працях [13, 14] розглядається застосування в задачах технічного діагностування нечітких нейронних мереж. Але доцільність такого підходу обумовлена наявністю якісної шкали виміру діагностичних ознак. В задачах технічного діагностування як правило використовується кількісна шкала виміру, за якою для аналізу закономірностей діагностичних ознак доцільно використовувати більш розвинений апарат багатовимірного статистичного аналізу [15].

Один із перспективних шляхів інформаційного синтезу інтелектуальних систем функціонального діагностування складних машин полягає у застосуванні ідей і методів так званої інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології) аналізу даних [16, 17]. В праці [18] розглядався алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання електроприводу багатоканатної ШПМ, який дозволив в рамках геометричного підходу побудувати високодостовірні лінійні вирішальні правила. Але функціональне діагностування всієї ШПМ вимагає використання потужного алфавіту класів розпізнавання, що обумовлює необхідність переходу від лінійних до ієрархічних алгоритмів машинного навчання. При цьому актуальною є задача оптимізації ієрархічної структури даних, оскільки розташування в ній класів розпізнавання може суттєво

впливати на функціональну ефективність машинного навчання системи функціонального діагностування.

В статті розглядається метод інформаційно-екстремального машинного навчання системи функціонального діагностування багатоканатної ШПМ з оптимізацією ієрархічної структури даних.

Постановка задачі. Розглянемо формалізовану постановку задачі оптимізації ієрархічної структури даних в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання системи функціонального діагностування.

Нехай кожний клас розпізнавання характеризує технічний стан вузла машини, що діагностується. Дано ієрархічну структуру алфавіту класів розпізнавання $\{X_{h,s,m}^o | h = \overline{1,H}; s = \overline{1,S}; m = \overline{1,M}\}$, де H – кількість ярусів ієрархічної структури; S – кількість страт на h -му ярусі; M – кількість класів розпізнавання в s -й страті. За результатами моніторингу сигналів з датчиків інформації сформовано для кожної страти тривимірну навчальну матрицю $\|y_{m,i}^{(j)}\|, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,n}$, де N, n – кількість ознак розпізнавання і векторів-реалізацій класів розпізнавання відповідно. Крім того, задано структурований вектор параметрів машинного навчання системи функціонального діагностування

$$g_{h,s,m} = \langle x_{h,s,m}, d_{h,s,m}, \delta_{h,s}, h \rangle \quad (1)$$

де $x_{h,s,m}$ – двійковий усереднений вектор-реалізація, вершина якого визначає геометричний центр гіперсферичного контейнеру класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$ в бінарному просторі діагностичних ознак;

$d_{h,s,m}$ – кодова відстань, яка визначає радіус гіперсферичного контейнера класу $X_{h,s,m}^o$;

$\delta_{K,h,s,m,i}$ – параметр, який дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків i -ї діагностичної ознаки усередненого вектору-реалізації $x_{h,s,m}$ класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$;

h – ієрархічна структура алфавіту класів розпізнавання.

При цьому задано обмеження

$$d_{h,s,m} \in [0; d(x_{h,s,m} \oplus x_{h,s,c}) - 1],$$

де $d(x_{h,s,m} \oplus x_{h,s,c})$ – кодова відстань між усередненим вектором-реалізацією $x_{h,s,m}$ класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$ і усередненим вектором-реалізацією $x_{h,s,c}$ найближчого сусіднього класу розпізнавання $X_{h,s,c}^o$;

$$\delta_{K,h,s,i} \in \left[0; \frac{\delta_{H,h,s,m,i}}{2}\right],$$

де $\delta_{H,h,s,m,i}$ – поле нормованих (експлуатаційних) допусків i -ї діагностичної ознаки усередненого вектору-реалізації $x_{h,s,m}$ класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$

Необхідно в процесі машинного навчання шляхом цілеспрямованої перестановки класів розпізнавання в заданій структурі даних оптимізувати параметри вектору (1), які забезпечують максимальне

значення усередненого за стратами фінального ярусу інформаційного критерію

$$\bar{E}_{\max}^{\{H\}} = \frac{1}{S_H} \sum_{s=1}^{S_H} E_{\max}^{(s)} \quad (2)$$

де $E_{\max}^{(s)}$ – інформаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання розпізнавати реалізації класів розпізнавання s -ї страти фінального ярусу;

S_H – кількість страт фінального ярусу H ;

На етапі екзамену необхідно прийняти рішення про належність реалізації, що розпізнається, одному із класів заданого алфавіту.

Категорійна модель машинного навчання.

Математичну модель оптимізації структури класів розпізнавання представимо у вигляді орієнтованого графу відображення множин, що застосовуються в процесі ієрархічного машинного навчання. Категорійна модель включає вхідний математичний опис системи функціонального діагностування, який подано у вигляді структури [5]

$$\Delta_B = \langle T, G, \Omega, Z, Y, X; f_1, f_2 \rangle,$$

де T – множина моментів часу формування векторів-реалізацій класів розпізнавання;

G – фактори, що впливають на функціонування системи;

Ω – простір діагностичних ознак;

Z – простір технічних станів системи, які визначають алфавіт класів розпізнавання;

Y – вхідна багатовимірна навчальна матриця для заданого алфавіту $\{X_{h,s,m}^o\}$ класів розпізнавання;

X – бінарна навчальна матриця;

f_1 – оператор формування вхідної навчальної матриці;

f_2 – оператор перетворення вхідної навчальної матриці Y в бінарну матрицю X .

На рис. 1 показано категорійну модель інформаційно-екстремального машинного навчання системи функціонального діагностування з оптимізацією ієрархічної структури алфавіту класів розпізнавання.

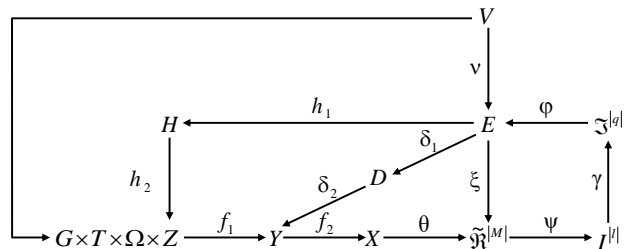


Рис. 1. Категорійна модель машинного навчання

На рис. 1 декартовий добуток $G \times T \times \Omega \times Z$ визначає універсум випробувань. Оператор θ відображає двійкові вектори-реалізації навчальної матриці X на розбиття $\mathfrak{R}^{|M|}$ простору діагностичних ознак на класи розпізнавання, а оператор ψ перевіряє

основну статистичну гіпотезу про належність реалізацій відповідному класу розпізнавання. За результатами статистичної перевірки гіпотез формується множина гіпотез $I^{|s|}$, де s – кількість статистичних гіпотез, а оператор γ формує множину точнісних характеристик $\mathfrak{S}^{|q|}$, де $q = s^2$. Оператор ϕ обчислює множину E значень інформаційного критерію оптимізації параметрів навчання, а оператор $\xi: E \rightarrow \mathfrak{R}^{|M|}$ на кожному кроці машинного навчання відновлює в радіальному базисі простору ознак контейнери класів розпізнавання. Контур оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання замикається через терм-множину D – систему контрольних допусків, які використовуються як рівні квантування ознак розпізнавання при формуванні робочої бінарної навчальної матриці. Наявність бінарної навчальної матриці дозволяє змінювати шляхом квантування за рівнем діагностичні ознаки з метою адаптації вхідного математичного опису до максимальної достовірності діагностичних рішень. Крім того категорійна модель має додатковий контур оптимізації структури даних в заданій ієрархічній структурі, який замикається через множину H , що містить варіанти структур даних в заданій ієрархічній структурі. Згідно з принципом відкладених рішень у випадку недосягнення високої функціональної ефективності машинного навчання категорійна модель передбачає можливість переходу до іншого більш складного типу вирішальних правил. З цієї метою в зовнішньому контурі оптимізації знаходиться множина V – набір геометричних форм контейнерів класів розпізнавання (гіпереліпсоїдних, гіперциліндродних тощо), які відновлюються в процесі машинного навчання в радіальному базисі простору діагностичних ознак. Оператор $u: V \rightarrow G \times T \times \Omega \times Z$ регламентує процес машинного навчання системи функціонального діагностування.

Алгоритм машинного навчання. Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання з оптимізацією структури класів розпізнавання в заданій ієрархічній структурі представимо у вигляді ітераційної процедури пошуку глобального максимуму усередненого за алфавітом $\{X_m^o\}$ інформаційного критерію (2) в робочій області визначення його функції

$$h^* = \arg \max_{G_h} \{ \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E} \bar{E} \} \}, \quad (3)$$

де G_h – область допустимих значень параметра машинного навчання h .

Розглянемо основні етапи реалізації алгоритму оптимізації ієрархічної структури даних в рамках ІЕІ-технології.

1. Обнуління лічильника варіантів ієрархічних структур (кроків навчання): $r := 0$.

2. Ініціалізація лічильника варіантів ієрархічних структур: $r := r + 1$.

3. Обнуління лічильника ярусів структури даних: $h := 0$.

4. Ініціалізація лічильника ярусів структури даних: $h := h + 1$.

5. Обнуління лічильника страт ярусу: $s := 0$.

6. Ініціалізація лічильника ярусу: $s := s + 1$.

7. Для кожної s -ї страти h -го ярусу r -ї ієрархічної структури реалізується інформаційно-екстремальний алгоритм навчання з паралельно-послідовною оптимізацією контрольних допусків на діагностичні ознаки, який обчислює усереднене по всіх стратах ярусу максимальне значення інформаційного критерію $\bar{E}_{r,h,s}^*$.

8. Якщо $s \leq S_h$, де S_h – кількість страт на h -му ярусі, то виконується пункт 6, інакше – пункт 9.

9. Якщо $h \leq h_{\max}$, де h_{\max} – кількість ярусів r -ї структури даних, то виконується пункт 4, інакше – пункт 10.

10. Обчислюється усереднене по всіх ярусах структури даних максимальне значення інформаційного критерію оптимізації $\bar{E}_{r,h}^*$.

11. Якщо $r \leq r_{\max}$, де r_{\max} – кількість ієрархічних структур даних, то виконується пункт 2, інакше – пункт 12.

12. Визначається оптимальна ієрархічна структура даних: $h_r^* = \arg \max_{\{r\}} \bar{E}_{r,h}^*$.

13. ЗУПИН.

Таким чином, у рамках ІЕІ-технології алгоритм оптимізації ієрархічної структури даних зводиться до цілеспрямованої процедури пошуку глобального максимуму інформаційного критерію для різних варіантів ієрархічних структур алфавіту класів розпізнавання і вибору оптимального із них.

Приклад реалізації алгоритму. Як приклад реалізації алгоритму оптимізації ієрархічної структури даних розглянемо машинне навчання системи функціонального діагностування вузлів багатоканатної шахтної підйомної машини. Як вхідні дані розглядалися значення діагностичних ознак, які періодично зчитувалися з датчиків інформації в процесі функціонування шахтної підйомної машини. Вхідна навчальна матриця була сформована за архівними даними, наданими підприємством «УЛІС Системс», яке займається модернізацією системи керування шахтної підйомної машини в «ДТЕК Павлоградвугілля» (м. Павлоград, Україна).

Моделювання машинного навчання системи функціонального діагностування здійснювалося для чотирьох класів розпізнавання: клас X_1^o характеризував функціональний стан шахтної підйомної машини «Норма», клас X_2^o – підвищена температура підшипників електродвигуна, клас X_3^o – підвищений температурний режим обмотки електроприводу і клас X_4^o – функціональний стан канатоведучих шківів, радіуси яких були «Більше норми».

На практиці в системах функціонального діагностування класи розпізнавання перетинаються в просторі діагностичних ознак через близькість центрів розсіювання векторів-реалізацій сусідніх класів, що може суттєво зменшити достовірність діагностичних

рішень. З метою збільшення середньої міжкласової відстані здійснювалося надлишкове кодування двійкових векторів-реалізацій робочої навчальної матриці за циклічним методом Боуза – Чоудхурі – Хігвієми. У результаті кодування мінімальна кодова відстань Хеммінга для усереднених векторів-реалізацій класів розпізнавання дорівнювала $d_{\min} = 5$.

Для наочності розглядалися показані на рис.2 три варіанти структур даних для заданого алфавіту класів розпізнавання.

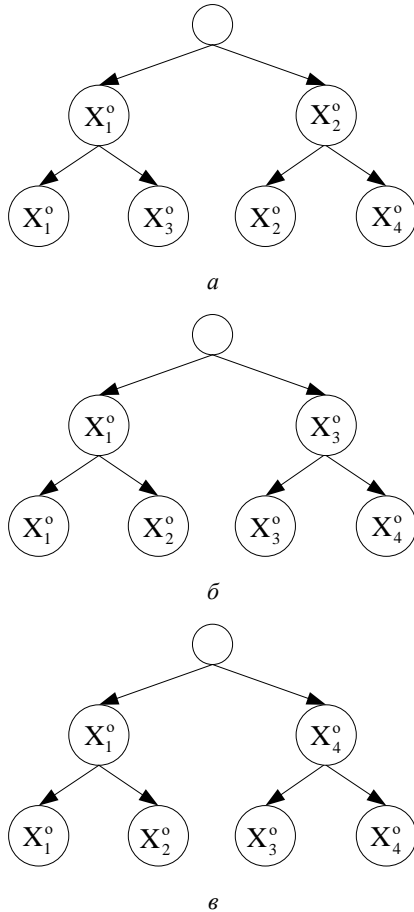


Рис. 2. Варіанти ієрархічних структур даних

Моделювання машинного навчання системи функціонального діагностування вузлів шахтної підйомної машини здійснювалося за алгоритмом (3). При цьому в процесі машинного навчання оптимізувалася система контрольних допусків на діагностичні ознаки за паралельною схемою, при якій контрольні допуски змінювалися для всіх ознак одночасно. Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання системи функціонального діагностування розглядався модифікований в праці [5] інформаційний критерій Кульбака, який для рівно ймовірних двох альтернативних гіпотез має вигляд

$$E_{h,s,m}^{(k)} = \frac{1}{2} \{ 2 - [\alpha_{h,s,m}^{(k)}(d) + \beta_{h,s,m}^{(k)}(d)] * \quad (4)$$

$$* \log_2 \frac{2 - [\alpha_{h,s,m}^{(k)}(d) + \beta_{h,s,m}^{(k)}(d)] + 10^{-r}}{[\alpha_{h,s,m}^{(k)}(d) + \beta_{h,s,m}^{(k)}(d)] + 10^{-r}}$$

де $\alpha_{h,s,m}^{(k)}(d)$ – помилка першого роду при прийнятті класифікаційних рішень, обчислена в процесі відновлення гіперсферичного контейнера класу розпізнавання X_m^o ;

$\beta_{h,s,m}^{(k)}(d)$ – помилка другого роду при прийнятті класифікаційних рішень, обчислена в процесі відновлення гіперсферичного контейнера класу розпізнавання X_m^o з радіусом d ;

d – радіус гіперсферичного контейнера класу розпізнавання, який в процесі машинного навчання відновлюється в радіальному базисі простору діагностичних ознак

10^{-r} – достатньо мале число, яке вводиться для уникнення поділу на нуль.

При обчисленні інформаційного критерію оптимізації (4) в процесі реалізації алгоритму машинного навчання замість точнісних характеристик використовувалися їх оцінки:

$$\alpha_{h,s,m}^{(k)}(d) = \frac{K_{1,h,s,m}^{(k)}(d)}{n}; \quad (5)$$

$$\beta_{h,s,m}^{(k)}(d) = \frac{K_{2,h,s,m}^{(k)}(d)}{n},$$

де $K_{1,h,s,m}^{(k)}(d)$ – кількість подій, при яких реалізації класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$ не відносяться до свого класу;

$K_{2,h,s,m}^{(k)}(d)$ – кількість подій, при яких “чужі” реалізації помилково відносяться до класу розпізнавання $X_{h,s,m}^o$;

n – обсяг репрезентативної навчальної вибірки.

Після підстановки оцінок точнісних характеристик у формулу (4) було отримано робочу формулу для обчислення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання системи функціонального діагностування

$$E_{h,s,m}^{(k)}(d) = \frac{1}{n} \{ n - [K_{1,h,s,m}^{(k)}(d) + K_{2,h,s,m}^{(k)}(d)] * \quad (6)$$

$$* \log_2 \frac{2n - [K_{1,h,s,m}^{(k)}(d) + K_{2,h,s,m}^{(k)}(d)] + 10^{-r}}{[K_{1,h,s,m}^{(k)}(d) + K_{2,h,s,m}^{(k)}(d)] + 10^{-r}}$$

Нормований критерій оптимізації параметрів машинного навчання представимо у вигляді

$$J_{h,s,m}^{(k)}(d) = \frac{E_{h,s,m}^{(k)}(d)}{E_{max}}, \quad (7)$$

де E_{max} – максимальне значення критерію (6), яке він приймає при підстановці $K_{1,h,s,m}^{(k)}(d) = K_{2,h,s,m}^{(k)}(d) = 0$.

Результати оптимізації ієрархічних структур, показаних на рис. 2, наведено в табл.1. При цьому критерій (7) обчислювався при параметрах $n = 40$, $r = 2$.

Таблиця 1 – Результати оптимізації ієрархічних структур даних

№ структури	$\bar{J}_{max}^{(2)}$	$\bar{\alpha}(d)$	$\bar{\beta}(d)$
1	0,67	0,40	0,01
2	0,69	0,35	0,02
3	0,74	0,22	0,02

У табл. 1 прийнято такі позначення:

$\bar{J}_{max}^{(2)}$ – усереднене за втратами нижнього ярусу ієрархічних структур даних (рис.2) значення нормованого критерію (7);

$\bar{\alpha}(d)$ – усереднене значення помилки першого роду;

$\bar{\beta}(d)$ – усереднене значення помилки другого роду.

Аналіз табл. 1 показує, що найбільше значення, усередненого за втратами нижнього ярусу заданих ієрархічних структур, інформаційного критерію отримано для третьої структури (рис. 2, в), яке дорівнює $\bar{J}_{max}^{(2)} = 0,74$.

На рис. 3 показано графіки залежності інформаційного критерію (7) від радіусів контейнерів класів розпізнавання, які входять в ієрархічну структуру (рис. 2, в).

На рис. 3 подвійною штриховкою позначено роботу (допустиму) область визначення функції критерію (7), в якій помилки першого і другого роду не перевищують відповідно першу і другу достовірності. Аналіз рис. 3 показує, що для оптимальної структури даних (рис. 2, в) отримано такі оптимальні радіуси контейнерів класів розпізнавання: для класу X_1^o оптимальний радіус дорівнює $R_1^* = 32$ (тут і далі в кодових одиницях); для класу $X_2^o - R_1^* = 32$; для класу $X_3^o - R_2^* = 33$; і для класу $X_4^o - R_3^* = 23$;

За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними параметрами контейнерів класів розпізнавання в рамках геометричного підходу побудовано такі вирішальні правила:

$$(\forall x^{(j)} \in \tilde{X}^{|M|})(\forall X_m^o \in \tilde{X}^{|M|})\{if (\{\bar{\mu}_m\}) \& (\bar{\mu}_m > c) \text{ then } x^{(j)} \in X_m^o \text{ else } x^{(j)} \notin X_m^o\}, \quad (8)$$

де $\bar{\mu}_m$ – усереднене значення функції належності реалізацій гіперсферичному контейнеру класу розпізнавання X_m^o

$\{\bar{\mu}_m\}$ – множина усереднених значень функцій належності для алфавіту класів розпізнавання $\{X_m^o\}$;

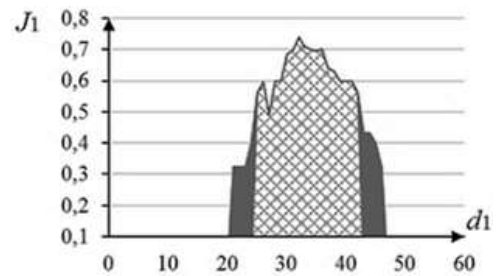
c – порогове значення, яке задається в інтервалі $0 < c < 1$

Функція належності для гіперсферичного контейнера класу X_m^o розглядалася у вигляді [9],

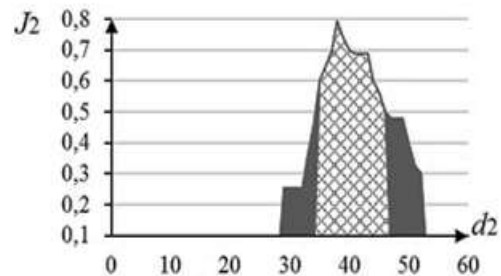
де $d[x_m \oplus x^{(j)}]$ – кодова відстань між усередненим вектором-реалізацією класу X_m^o і вектором-реалізацією $x^{(j)}$, що розпізнається;

d_m^* – оптимальний радіус контейнера класу X_m^o .

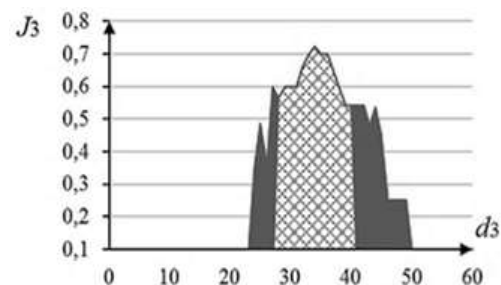
За результатами тестування системи за екзаменаційною матрицею усереднена за алфавітом класів розпізнавання повна ймовірність правильного прийняття діагностичних рішень дорівнювала $P_t = 0,88$.



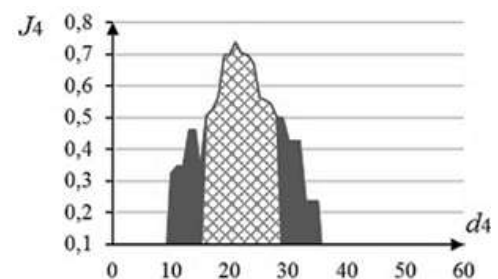
a



б



в



г

Рис. 3. Графіки залежності інформаційного критерію від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а – клас X_1^o ; б – клас X_2^o ; в – клас X_3^o ; г – клас X_4^o

Висновки. Запропоновано алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання системи

функціонального діагностування складної машини з оптимізацією ієрархічної структури даних. На прикладі системи функціонального діагностування багатоканальної підйомної машини показано, що функціональна ефективність машинного навчання залежить від розташування класів розпізнавання в ієрархічній структурі. За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання побудовано високо достовірні вирішальні правила, які практично інваріантні до багато вимірності простору діагностичних ознак. В перспективі для розширення алфавіту класів розпізнавання планується застосувати метод інформаційно-екстремального факторного аналізу, який дозволяє перенавчати систему функціонального діагностування.

Список літератури

1. Попов Ю. В., Тимухин С. А., Садыков Е. Л. Проблемы повышения эффективности шахтных многоканатных подъемных установок с наземным расположением подъемных машин. *Известия УГГУ*. 2010. № 24. С. 59–67
2. Bhowmik, P. S., Pradhan S., Prakash, M. Faultdiagnostic and monitoring methods of induction motor: a review. *International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics*. 2013. Vol. 1. P. 1–18.
3. Герике Б. Л., Герике П. Б., Шахманов В. Н. Динамическая диагностика машинных агрегатов горного оборудования *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 5. С. 80–89.
4. Andrzej O., Zygmunt S. Modern Methods Control and Diagnostics of Hoisting-Machines with Application of Artificial Intelligence Methods. *Archives of Mining Sciences*. 2010. Vol. 55, no. 1. P. 217–231.
5. Szymański, Z. Intelligent, Energy Saving Power Supply and Control System of Hoisting Mine Machine with Compact and Hybrid Drive System. *Układy Zasilania I Sterowania Górniczych Maszyn Wyciągowych Z Napędem Zintegrowanym Lub Hybrydowym*. *Archives of Mining Sciences*, 2017. Vol. 60(1). P. 239–251. DOI:10.1515/amsc-2015-0016
6. Сидоренко В. Н., Черный А. П. Мониторинг мощных электроприводов на основе технологии data mining. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2011. № 3. С. 414–416.
7. Скакалина О. В. Прикладні аспекти використання методу групового урахування аргументів при короткостроковому прогнозуванні *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 6. С. 80–88.
8. Арженовский С. В., Молчанов И. Н., *Статистические методы прогнозирования : учебное пособие для аспирантов*. Ростов-на-Дону: РГЭУ, 2001. 74 с.
9. Довбиш А. С. *Основы проектирования интеллектуальных систем: Навчальний посібник*. Суми: СумДУ, 2009. 171 с.
10. Джордж Ф. Люггер. *Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем*. Москва, Санкт-Петербург, Киев: Вильямс, 2003. 864 с.
11. Ching-Lien Huang, Tsung-Shin Hsu, Chih-Ming Liu. The Mahalanobis-Taguchi system - Neural network algorithm for data-mining in dynamic environments. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009. Vol. 36, issue 3. P. 5475–5480. DOI 10.1016/j.eswa.2008.06.120
12. Осовский С. пер. с польского И. Д. Рудинского *Нейронные сети для обработки информации*. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
13. Hasan A. Yousef, Manal Wahba A. Adaptive fuzzy mimo control of induction motors *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009. Vol. 36, issue 3. P. 4171–4175. DOI 10.1016/j.eswa.2008.04.004
14. Subbotin S. The neuro-fuzzy network synthesis and simplification on precedents in problems of diagnosis and pattern recognition. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2013. Vol. 22. № 2. P. 97–103. DOI: 10.3103/s1060992x13020082
15. James D. Miller. *Statistics for Data Science: Leverage the power of statistics for Data Analysis, Classification, Regression, Machine Learning, and Neural Networks*. Packt Publishing Ltd, 2017. 286 p.
16. Li Juanli and Yang Zhaojian. Research on Fault Diagnosis Method of Hoist in Semantic Environment. *Information Technology Journal*. 2013. Vol. 12. P. 2581–2586. DOI: 10.3923/ijtj.2013.2581.2586
17. Dovbysh, A.S., Martynenko, S. S., Kovalenko, A. S., Budnyk, M. M. Information-extreme algorithm for recognizing current distribution maps in magnetocardiography. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2011. Vol. 43, № 2. P. 63–70. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i2.60.
18. Довбиш А. С., Зимовець В. І., Козлов З. С. Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання системи функціонального контролю електроприводу шахтної підйомної машини. *Радиоэлектроника и информатика*, 2017. № 4. С. 58–63.

References (transliterated)

1. Popov Yu. V. Problemyi povysheniya effektivnosti shahtnyih mnogokanatnyih pod'emnyih ustanovok s nazemnyim raspolozheniem pod'emnyih mashin [The problems of increasing the efficiency of mine multi-channel hoisting machines with the ground location of lifting machines]. *Izvestiya UGGU [News of the Ural State Mining University]*. 2010, no. 24, pp. 59–67.
2. Bhowmik P. S., Pradhan S., Prakash M. Faultdiagnostic and monitoring methods of induction motor: a review. *International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics*. 2013, vol. 1, pp. 1–18.
3. Gerike B. L., Gerike P. B., Shahmanov V. N. Dinamicheskaja diagnostika mashinnyh agregatov gornogo oborudovaniya [Dynamic diagnostics of machine units of mining equipment]. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2011, no 5, pp. 80–89.
4. Andrzej O., Zygmunt S. Modern Methods Control and Diagnostics of Hoisting-Machines with Application of Artificial Intelligence Methods. *Archives of Mining Sciences*. 2010, vol. 55, no. 1, pp. 217–231.
5. Szymański, Z. Intelligent, Energy Saving Power Supply and Control System of Hoisting Mine Machine with Compact and Hybrid Drive System Szymański, Z., Układy Zasilania I Sterowania Górniczych Maszyn Wyciągowych Z Napędem Zintegrowanym Lub Hybrydowym. *Archives of Mining Sciences*. 2017, vol. 60(1), pp. 239–251. DOI:10.1515/amsc-2015-0016
6. Sidorenko V. N., Chernyy, A. P. (2011). Monitoring of powerful electric drives on the basis of Data Mining technology]. *Elektrotechnichni ta komp'yuterni sistemi – Electrical and computer systems*, no. 3, pp. 313–316.
7. Skakalina O. V. Prikladni aspekti vikoristannya metodu grupovogo urahuvannya argumentiv pri korotkostrokovomu prognozuvanni [Applied aspects of the use of the method of group consideration of arguments in the short-term forecasting] *Naukovij visnik NGU*, 2015, no. 6, pp. 80–88
8. Arzhenovskiy S. V., Molchanov I. N. *Statisticheskie metodyi prognozirovaniya : uchebnoe posobie dlya aspirantov* [Statistical methods of forecasting: a textbook for graduate students] Rostov-na-Donu, RGEU Publ., 2001. 74 p.
9. Dovbysh A.C. *Osnovy proektuvannya intelektualnykh system: Navchalnyy posibnyk* [Fundamentals of Designing Intelligent Systems: Textbook] – Sumy, SumDU Publ., 2009. 171 p.
10. Dzhordzh F. Lyugger. *Iskusstvennyiy intellekt. Strategii i metodyi resheniya slozhnyih problem* [Artificial Intelligence. Strategies and methods for solving complex problems]. Moscow, St. Petersburg, Kiev, Williams Publ., 2009. 864 p.
11. Ching-Lien Huang, Tsung-Shin Hsu, Chih-Ming Liu. The Mahalanobis-Taguchi system - Neural network algorithm for data-mining in dynamic environments. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009. Vol. 36, issue 3, pp. 5475–5480. DOI 10.1016/j.eswa.2008.06.120
12. Osovskiy S., trans. with Polish I. D. Rudinsky *Neyronnyie seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finance and Statistics Publ., 2004. 344 p.
13. Hasan A. Yousef, Manal Wahba A. Adaptive fuzzy mimo control of induction motors *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009, vol. 36, issue 3, pp. 4171–4175. DOI 10.1016/j.eswa.2008.04.004

14. Subbotin S. The neuro-fuzzy network synthesis and simplification on precedents in problems of diagnosis and pattern recognition. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2013, vol. 22, no 2, pp. 97–103. DOI: 10.3103/s1060992x13020082
15. James D. Miller. *Statistics for Data Science: Leverage the power of statistics for Data Analysis, Classification, Regression, Machine Learning, and Neural Networks*. Packt Publishing Ltd, 2017. 286 p.
16. Li Juanli and Yang Zhaojian. Research on Fault Diagnosis Method of Hoist in Semantic Environment. *Information Technology Journal*. 2013, vol. 12, pp. 2581–2586. DOI: 10.3923/itj.2013.2581.2586
17. Dovbysh, A.S., Martynenko, S. S., Kovalenko, A. S., Budnyk, M. M. Information-extreme algorithm for recognizing current distribution maps in magnetocardiography. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2011, vol. 43, no. 2, pp. 63–70. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i2.60.
18. Dovbish A. S, Zimovets V. I., Kozlov Z. S. Informatsiyno-ekstremalniy algoritm navchannya sistemi funktsionalnogo kontrolyu elektroprivodu shahtnoyi pldyomnoyi mashini [Information-extreme learning algorithm for the system of functional control of the electric drive of a shaft lifting machine]. *Radioelektronika i informatika*. 2017, pp. 58–63.

Надійшло (received) 05.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довбиш Анатолій Степанович (Довбиш Анатолій Степанович, Dovbysh Anatoly Stepanovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук; Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1829-3318>; e-mail: a.dovbysh@cs.sumdu.edu.ua

Зимовець Вікторія Ігорівна (Зимовець Вікторія Ігорівна, Zimovets Victoria Ihorivna) – вчитель інформатики, загальноосвітня школа № 11, вул. Свободи, 8, м. Конотоп, Україна, 41692; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4604-4087>; e-mail: zc.vika@gmail.com

Бібік Мирослав Віталійович (Бібік Мирослав Віталійович, Bibyk Myroslav Vyalyiovich) – асистент, Конотопський інститут Сумського державного університету, вул. Миру, 24, м. Конотоп, Україна, 41692; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0431-7200>; e-mail: bibikm@gmail.com

УДК 004.93'1

DOI: 10.20998/2079-0023.2018.44.09

І. В. ШЕЛЕХОВ, С. О. ПИЛИПЕНКО, О. О. СТОЛЯРЧУК, Т. А. РОМАНЕНКО

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНЕ МАШИННЕ НАВЧАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

Розглядається алгоритм машинного навчання комп'ютеризованої системи контролю знань за тестовими завданнями. При цьому машинне навчання здійснюється в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології аналізу даних, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи в процесі її навчання. Як ознаки розпізнавання розглядалися результати відповідей студентів на тестові завдання, які оцінювалися за стобальною шкалою. Запропоновано алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання з паралельно-послідовною оптимізацією системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Як параметр машинного навчання, що оптимізується, розглядався нижній контрольний допуск на ознаки розпізнавання при фіксованому верхньому допуску. При цьому отримані в процесі паралельної оптимізації квазіоптимальні контрольні допуски на ознаки розпізнавання використовувалися як стартові при реалізації алгоритму машинного навчання з послідовною оптимізацією. Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання розглядалася модифікована інформаційна міра Кульбака, яка є функціоналом від точнісних характеристик класифікаційних рішень. Оскільки, специфіка контролю знань полягає в тому, що алфавіт класів є структурованим, то розглядалася вкладена структура контейнерів класів розпізнавання, які характеризують відповідні рівні знань. При цьому вкладена структура характеризувалася загальним центром розсіювання векторів-реалізацій класів розпізнавання. Така структура на відміну від полімодальних контейнерів класів розпізнавання дозволила підвищити оперативність машинного навчання та достовірність вирішальних правил. Перевірка працездатності запропонованого алгоритму машинного навчання здійснювалася за репрезентативною вхідною навчальною матрицею, яка була сформованою за результатами тестування студентів за навчальною дисципліною.

Ключові слова: інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія, машинне навчання, оптимізація, система контрольних допусків, ознака розпізнавання, гіперсферичний контейнер класу розпізнавання.

І. В. ШЕЛЕХОВ, С. А. ПИЛИПЕНКО, А. А. СТОЛЯРЧУК, Т. А. РОМАНЕНКО

ИНФОРМАЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Рассматривается алгоритм машинного обучения компьютеризированной системы контроля знаний по тестовым заданиям. При этом машинное обучение осуществляется в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии анализа данных, которая основана на максимизации информационной способности системы в процессе ее обучения. В качестве признаков распознавания рассматривались результаты ответов студентов на тестовые задания, которые оценивались по стобальной шкале. Предложен алгоритм информационно-экстремального машинного обучения с параллельно-последовательной оптимизацией системы контрольных допусков на признаки распознавания. Как параметр машинного обучения, который оптимизируется, рассматривался нижний контрольный допуск на признаки распознавания при фиксированном верхнем допуске. При этом полученные в процессе параллельной оптимизации квазиоптимальные контрольные допуски на признаки распознавания использовались как стартовые при реализации алгоритма машинного обучения с последовательной оптимизацией. Как критерий оптимизации параметров машинного обучения рассматривалась

© І. В. Шелехов, С. О. Пилипенко, О. О. Столярчук, Т. А. Романенко, 2018

модифицированная информационная мера Кульбака, которая является функционалом от точностных характеристик классификационных решений. Поскольку специфика контроля знаний заключается в том, что алфавит классов является структурированным, то рассматривалась вложена структура контейнеров классов распознавания, характеризующих соответствующие уровни знаний. При этом вложена структура характеризовалась общим центром рассеивания векторов-реализаций классов распознавания. Такая структура в отличие от полимодальных контейнеров классов распознавания позволила повысить оперативность машинного обучения и достоверность решающих правил. Проверка работоспособности предложенного алгоритма машинного обучения осуществлялась по репрезентативной входной учебной матрицей, которая была сформирована по результатам тестирования студентов по учебной дисциплине.

Ключевые слова: информационно-экстремальная интеллектуальная технология, машинное обучение, оптимизация, система контрольных допусков, признак распознавания, гиперсферический контейнер класса распознавания.

I. V. SHELEHOV, S. O. PYLYPENKO, O. O. STOLYARCHUK, T. A. ROMANENKO
INFORMATION-EXTREME MACHINE LEARNING OF KNOWLEDGE CONTROL SYSTEM

The algorithm of machine learning of an automated subsystem of control of students' knowledge according to the test tasks of the computerized education system is considered. In this case, machine learning is carried out within the framework of information-extreme intellectual technology of data analysis, which is based on maximizing the information capacity of the system in the process of its improvement. The results of students' answers to test tasks were considered as signs of recognition, which were evaluated on a scale from 0 to 100. The algorithm of information-extreme machine learning with parallel-sequential optimization of the system of control tolerances on recognition signs was suggested. The lower control tolerance for recognition attributes, with a fixed upper control tolerance, was considered as an optimized machine learning parameter. In this case, quasi-optimal control tolerances on the signs of recognition, obtained in the process of parallel optimization, were used as the starting point for the implementation of a machine learning algorithm with sequential optimization. Kullback modified information measure, which is a function of the exact characteristics of classification decisions, was considered as an optimization criterion of machine learning characteristics. Since the specificity of knowledge control is that the class alphabet is structured, so the enclosed structure of container classes of recognition, which characterize the corresponding levels of knowledge, was considered. In this case, the enclosed structure was characterized by the general center of scattering of vector-realization classes of recognition. This structure, in contrast to polymodal containers of recognition classes, has allowed increasing of the efficiency of machine learning and the validity of decisive rules. The verification of the workability of the suggested algorithm for machine learning was carried out on the basis of a representative input matrix, which was formed on the basis of the student test results of the discipline.

Keywords: information-extreme intellectual technology, machine learning, optimization, system of control tolerances, recognition sign, hyper-spherical container of recognition class.

Вступ. Комп'ютеризовані системи контролю знань стали невід'ємною частиною сучасних технологій в освіті. Такі системи спочатку широко використовувалися в навчальному процесі студентів заочної та дистанційної форм навчання [1, 2]. У теперішній час вони відіграють важливу роль при переході на так звану змішану форму навчання, яка поєднує e-Learning і традиційні технології денного навчання [3–5]. Саме змішане навчання дозволяє студенту обирати зручний час та місце навчання, індивідуальний темп засвоєння знань. При цьому важливу роль відіграє підвищення достовірності машинних методів контролю знань за тестовими завданнями. Наближення результатів машинного контролю знань до оцінок кваліфікованого викладача людини залишається актуальною проблемою. Для вирішення цієї проблеми широко використовуються інтелектуальні інформаційні технології [6, 7]. Найбільш поширеними методами інформаційного синтезу систем машинного контролю знань в освіті є методи на основі штучних нейронних мереж [8–10]. Але при цьому нейронним мережам як структурним методам притаманний недолік, пов'язаний із складністю перенавчання системи через динамічність навчального процесу. Вимога Європейського освітнього стандарту про щорічне оновлення не менше 20 відсотків навчального контенту робить необхідним розроблення нової системи контролю знань. Крім того, суттєвим недоліком штучних нейронних мереж є їх чутливість до багато вимірності простору ознак розпізнавання. Ці недоліки усуваються в методах інтелектуального аналізу даних, вирішальні правила яких будуються в рамках геометричного підходу. Одним із перспективних напрямків є застосування ідей і методів так званої інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-техно-

логії) аналізу даних, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи в процесі її машинного навчання [11–13]. У праці [14] розглядалася задача інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань. При цьому побудовані вирішальні правила не забезпечили високу функціональну ефективність системи контролю знань через застосування полімодальних контейнерів класів розпізнавання з розподіленими в просторі ознак центрами розсіювання їх реалізацій.. Оскільки алфавіт класів розпізнавання в задачах оцінювання рівня знань має ієрархічну структуру, то це робить доцільним перехід до вирішальних правил, побудованих за вкладеними контейнерами класів розпізнавання з єдиним центром розсіювання. Тому вирішальні правила побудовані за геометричними параметрами вкладених контейнерів класів будемо називати унімодальними. У праці [14] запропоновано алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання унімодального класифікатора. Але отримані результати носять модельний характер, оскільки розглядалося чітке розбиття простору ознак на класи розпізнавання, що не притаманно при оцінюванні рівня знань.

У статті розглядається інформаційно-екстремальний метод машинного навчання системи контролю знань з вкладеними контейнерами класів розпізнавання, що перетинаються.

Постановка задачі. Розглянемо формалізовану постановку задачі інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань за тестовими завданнями. Нехай дано алфавіт $\{X_m^0 | m = \overline{1, M}\}$ класів розпізнавання, які характеризують рівні знань студентів. За результатами відповідей студентів на тестові завдання за адитивною оціночною функцією з наперед заданими ваговими

коефіцієнтами відповідей на тестові завдання сформовано навчальну матрицю

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

де N – кількість ознак розпізнавання, яка дорівнює кількості тестів;

n – кількість структурованих векторів-реалізацій (далі просто реалізації), координатами яких є значення ознак розпізнавання.

При цьому алфавіт $\{X_m^0\}$ є ієрархічною вкладеною структурою, в якій вершина вектора, усередненого за ансамблем реалізацій є центром розсіювання реалізацій всіх класів розпізнавання. Крім того, для вкладених контейнерів класів розпізнавання відомий вектор параметрів навчання, які впливають на її функціональну ефективність,

$$g_m = \langle R_{1,m}, R_{2,m}, \delta \rangle, m = \overline{1, M}, \quad (1)$$

де $R_{1,m}$ – внутрішній радіус контейнера класу X_m^0 ;

$R_{2,m}$ – зовнішній радіус контейнера класу X_m^0 ;

δ – несиметричне поле контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

При цьому на параметри навчання δ накладаються обмеження

$$R_{1,m} \in [0, N], R_{2,m} \in [0, N], \delta \in [0, y_{\max}],$$

де y_{\max} – максимальне значення оціночної шкали.

Необхідно на етапі машинного навчання системи контролю знань оптимізувати (тут і далі в інформаційному розумінні) параметри машинного навчання вектора (1) шляхом пошуку глобального максимуму інформаційного критерію в робочій області визначення його функції:

$$E_m^* = \max_{G_E \cap \{k\}} E_m^{(k)}, m = \overline{1, M}, \quad (2)$$

де $E_m^{(k)}$ – обчислений на k -му кроці машинного навчання інформаційний критерій оптимізації параметрів навчання системи розпізнавання реалізації класу X_m^0 ;

G_E – робоча область визначення функції інформаційного критерію;

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

За результатами машинного навчання побудувати вирішальні правила рішення для прийняття в режимі екзамену високостовірних рішень про належність реалізації образу, що розпізнається, до одного із класів розпізнавання із заданого алфавіту.

Таким чином, задача інформаційно-екстремального машинного навчання полягає у відновленні в радіальному просторі ознак на кожному кроці навчання контейнерів класів розпізнавання шляхом цілеспрямованого наближення значення інформаційного критерію (2) до його максимального.

Категорійна модель машинного навчання. Математичну модель інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань розгля-

немо у вигляді орієнтованого графу, в якому ребра-оператори відображають відповідні множини одна на одну. Вхідним математичним описом такої категорійної моделі є структура

$$I_B = \langle T, G, \Omega, Z, Y, X, f_1, f_2 \rangle,$$

де T – множина моментів часу одержання інформації;

G – простір факторів, які впливають на процес оцінювання;

Ω – простір ознак розпізнавання;

Z – алфавіт класів розпізнавання, які характеризують відповідні рівні знань;

Y – вхідна багатовимірна навчальна матриця;

X – робоча бінарна навчальна матриця;

$f_1: T \times G \times \Omega \times Z \rightarrow Y$ – оператор формування вхідної навчальної матриці Y , де $T \times G \times \Omega \times Z$ – декартовий добуток, який задає універсум випробувань;

$f_2: Y \rightarrow X$ – оператор перетворення вхідної навчальної матриці Y в робочу бінарну матрицю X .

На рис. 1 показано категорійну модель інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань, яка будує вирішальні правила за геометричними параметрами вкладених контейнерів класів розпізнавання.

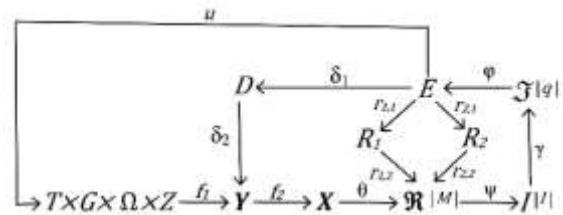


Рис. 1. Категорійна модель машинного навчання з вкладеними контейнерами

На рис. 1 оператор $\theta: X \rightarrow \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}$ відображає послідовно реалізації бінарної навчальної матриці в загальному випадку нечітке розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}$ бінарного простору ознак на класи розпізнавання. Оператор класифікації Ψ перевіряє основну статистичну гіпотезу про належність вхідної реалізації класу X_m^0 і формує множину гіпотез $I^{|l|}$, де l – кількість статистичних гіпотез. Оператор γ шляхом оцінки прийнятих гіпотез формує множину точнісних характеристик оціночних рішень $\mathfrak{Z}^{|q|}$, де $q = l^2$. Оператор Φ обчислює термножину E – значення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання, який є функціоналом від точнісних характеристик. На практиці роздільні гіперповерхні класів розпізнавання в загальному випадку є нечіткими. Цей факт вимагає для кожного класу розпізнавання визначення внутрішніх і зовнішніх радіусів їх контейнерів. З цією метою контури, які включають термножини R_1 і R_2 відновлюють у радіальному базисі простору ознак контейнери класів розпізнавання шляхом оптимізації їх внутрішніх і зовнішніх радіусів відповідно. При цьому внутрішній радіус базового класу X_1^0 за умовою

дорівнює нулю. Оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнавання здійснюється контуром операторів, який замикається через терм-множину D – систему впорядкованих значень контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Оператор

$$u: E \rightarrow T \times G \times \Omega \times Z$$

регламентує процес машинного навчання системи контролю знань.

Таким чином, показана на рис. 1 категорійна модель може розглядатися як узагальнена структурна схема алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань.

Алгоритм машинного навчання системи контролю знань. Згідно з категорійною моделлю (рис. 1) алгоритм машинного навчання системи контролю знань представимо у вигляді двохциклічної процедури оптимізації системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання

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

де $\bar{E}^{(k)}$ – обчислений на k -му кроці машинного навчання усереднений за алфавітом класів розпізнавання інформаційний критерій (2).

При цьому побудоване в радіальному базисі бінарного простору ознак оптимальне розбиття класів розпізнавання повинно відповідати умовам

$$\begin{aligned} & (\forall X_m^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) [X_m^0 \neq \emptyset] (\exists X_m^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) \\ & (\exists X_c^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) [X_m^0 \neq X_c^0 \rightarrow X_m^0 \cap X_c^0 \neq \emptyset]; \\ & (\forall X_{m-1}^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) (\forall X_m^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) (\forall X_{m+1}^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}) \\ & [(R_{1,m-1} < R_{1,m} < R_{1,m+1}) \& (R_{2,m-1} < R_{2,m} < \\ & \quad R_{2,m+1})]; \\ & \bigcup_{X_m^0 \in \tilde{\mathfrak{R}}^{|M|}} X_m^0 \subseteq \Omega_B; m \neq c, m, c = \overline{1, M}. \end{aligned}$$

де X_c^0 – сусідній клас розпізнавання, що межує з класом X_m^0 .

Крім того, виконуються умови

$$R_{1,m} = 0 \quad \text{і} \quad R_{2,m} = 0.$$

Як відомо в рамках ІЕІ-технології оптимізація системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання здійснюється послідовно за двома схемами алгоритмів. Спочатку реалізується алгоритм паралельної оптимізації, за яким контрольні допуски на кожному кроці машинного навчання системи змінюються одночасно для всіх ознак розпізнавання. Потім реалізується алгоритм послідовної оптимізації контрольних допусків. При цьому отримані на етапі паралельної оптимізації квазіоптимальні контрольні допуски приймаються як стартові для послідовної оптимізації, що дозволяє суттєво підвищити оперативність машинного навчання.

Інформаційно-екстремальне машинне навчання системи контролю знань почнемо з реалізації алгоритму паралельної оптимізації контрольних допусків

на ознаки розпізнавання для унімодальних вирішальних правил. Вхідними даними є тривимірний масив навчальної матриці $\{y_{m,i}^{(j)} \mid m = \overline{1, M}; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n}\}$ і U_{\max} – максимальне значення оціночної шкали, яке визначає верхній контрольний допуск на ознаки розпізнавання.

Розглянемо основні етапи алгоритму машинного навчання унімодального класифікатора з паралельною оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання:

- 1) обнулюється лічильник зміни параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання: $\delta := 0$;
- 2) $\delta := \delta + 1$;
- 3) обнулюється лічильник класів розпізнавання: $m := 0$;
- 4) $m := m + 1$;
- 5) формується тривимірний масив робочої бінарної навчальної матриці $\{x_{m,i}^{(j)}\}$, елементи якої обчислюються за правилом

$$x_{m,i}^{(j)}[k] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_{m,i}^{(j)} \geq U_{\max} - \delta \\ 0, & \text{якщо інакше} \end{cases}$$

- 6) обнулюється лічильник кроків зміни зовнішнього радіусу гіперсферичного контейнеру класу розпізнавання: $R_2 := 0$;
- 7) $R_2 := R_2 + 1$;
- 8) обнулюється лічильник кроків зміни зовнішнього радіусу гіперсферичного контейнеру класу розпізнавання: $R_1 := 0$;
- 9) $R_1 := R_1 + 1$;
- 10) обчислюються точнісні характеристики класифікаційних рішень шляхом перевірки основної статистичної гіпотези про належність реалізації класу X_m^0 ;
- 11) обчислюється інформаційний критерій (2) оптимізації параметрів машинного навчання системи контролю знань;
- 12) якщо $R_1 < R_2$, то виконується пункт 9, інакше – пункт 7;
- 13) якщо $R_2 = N$ то виконується пункт 4;
- 14) у робочій області G_E визначається максимальне значення E_m^* інформаційного критерію і відповідні йому оптимальні параметри $R_{1,m}$ і $R_{2,m}$;
- 15) якщо $m \leq M$, то виконується пункт 4, інакше – пункт 2;
- 16) якщо $\delta < U_{\max}$, то виконується пункт 2, інакше – пункт 17;
- 17) обчислюється усереднене за алфавітом класів розпізнавання максимальне значення інформаційного критерію (2), визначається оптимальне значення параметра поля контрольних допусків

$$\delta^* = \arg \bar{E}^*$$

і обчислюється оптимальний нижній контрольний допуск на ознаки розпізнавання:

$$A_{\text{НК}}^* = U_{\max} - \delta^*;$$

- 18) ЗУПИН.

Як інформаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання в методах ІЕІ-технології може використовуватися будь-яка інформаційна міра. Найбільшого поширення набули ентропійний критерій Шеннона та міра Кульбака. У праці [12] використано модифіковану інформаційну міру Кульбака, в якій розглядається добуток різниці повної ймовірності правильного прийняття рішень P_t і повної ймовірності помилкового прийняття рішень P_f на їх відношення:

$$E_m^{(k)} = [P_{t,m}^{(k)} - P_{f,m}^{(k)}] \log_2 \frac{P_{t,m}^{(k)}}{P_{f,m}^{(k)}} \quad (4)$$

де $P_{t,m}^{(k)}$ – обчислена на k -му кроці машинного навчання повна ймовірність правильної класифікації реалізацій класу розпізнавання X_m^0 ;

$P_{f,m}^{(k)}$ – обчислена на k -му кроці машинного навчання повна ймовірність неправильної класифікації реалізацій класу розпізнавання X_m^0 .

Згідно з теоремою про повну ймовірність при рівноймовірних гіпотезах двохальтернативних рішень має місце

$$P_{t,m}^{(k)} = 0,5D_{1,m}^{(k)} + 0,5D_{2,m}^{(k)} \quad (5)$$

де $D_{1,m}^{(k)}$ – обчислена на k -му кроці машинного навчання перша достовірність;

$D_{2,m}^{(k)}$ – обчислена на k -му кроці машинного навчання друга достовірність;

$$P_{f,m}^{(k)} = 0,5\alpha_m^{(k)} + 0,5\beta_m^{(k)} \quad (6)$$

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

$\beta_m^{(k)}$ – обчислена на k -му кроці машинного навчання помилка другого роду.

Після підстановки виразів (5) і (6) у формулу (4) отримаємо

$$E_m^{(k)} = 0,5[(D_{1,m}^{(k)} + D_{2,m}^{(k)}) - (\alpha_m^{(k)} + \beta_m^{(k)})] \times \log_2 \frac{D_{1,m}^{(k)} + D_{2,m}^{(k)}}{\alpha_m^{(k)} + \beta_m^{(k)}} \quad (7)$$

Скориставшись підстановками

$$\alpha_m^{(k)} = 1 - D_{1,m}^{(k)} \text{ і } D_{2,m}^{(k)} = 1 - \beta_m^{(k)},$$

формулу (7) перетворимо до вигляду

$$E_m^{(k)} = [(D_{1,m}^{(k)} - \beta_m^{(k)})] \log_2 \frac{1 + (D_{1,m}^{(k)} - \beta_m^{(k)})}{1 - (D_{1,m}^{(k)} - \beta_m^{(k)})} \quad (8)$$

Оскільки навчальна вибірка є скінченою, то на практиці замість точнісних характеристик оперують їх емпіричними частотами

$$D_{1,m}^{(k)} = \frac{K_{1,m}^{(k)}}{n_{\min}}; \beta_m^{(k)} = \frac{K_{2,m}^{(k)}}{n_{\min}} \quad (9)$$

де $K_{1,m}^{(k)}$ – кількість подій, при яких реалізації класу розпізнавання X_m^0 правильно класифікуються;

$K_{2,m}^{(k)}$ – кількість подій, при яких “чужі” реалізації помилково відносяться до класу розпізнавання X_m^0 ;

n_{\min} – мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки, який визначається, наприклад, за методом, наведеним у праці [11].

Із урахуванням оцінок (9) робоча формула для обчислення критерію (10) набуває вигляду

$$E_m^{(k)} = n_{\min} [(K_{1,m}^{(k)} - K_{2,m}^{(k)})] \times \log_2 \frac{n_{\min} + (K_{1,m}^{(k)} - K_{2,m}^{(k)}) + 10^{-r}}{n_{\min} - (K_{1,m}^{(k)} - K_{2,m}^{(k)}) + 10^{-r}} \quad (10)$$

де 10^{-r} – достатньо мала величина, яка вводиться для уникнення поділу на нуль.

У виразі (10) рекомендується значення r вибирати рівним кількості знаків у мантисі інформаційного критерію. На практиці це значення вибирається із інтервалу

$$1 < r \leq 3.$$

Алгоритм послідовної оптимізації подамо у вигляді процедури [11]

$$\delta_i^* = \arg \bigotimes_{l=1}^L \max_{G_S} \left\{ \max_{G_E \cap \{k\}} \bar{E}^{(k)} \right\}, i = \overline{1, N}, \quad (11)$$

де \bigotimes – символ операції повторення алгоритму послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання;

L – кількість прогонів алгоритму оптимізації.

Вхідними даними для алгоритму послідовної оптимізації параметрів машинного навчання системи контролю знань є:

- масив навчальної матриці $\{y_{m,i}^{(j)}\}$;
- отриманий при реалізації алгоритму паралельної оптимізації нижній контрольний допуск $A_{\text{НК}}^*$, який приймається за стартовий;
- верхній контрольний допуск $A_{\text{ВК}}^* = y_{\max}$.

При реалізації алгоритму (11) послідовно змінюється нижній контрольний допуск для кожної ознаки розпізнавання при заданому його стартовому значенні $A_{\text{НК}}^*$ для інших ознак розпізнавання, які не оптимізуються. Далі машинне навчання системи контролю знань здійснюється за етапами схеми алгоритму паралельної оптимізації. Оскільки отриманий при паралельній оптимізації нижній допуск є по суті квазіоптимальним, то послідовна оптимізація потребує декількох прогонів реалізації алгоритму (11) до тих пір, поки значення критерію оптимізації перестане змінюватися.

Вирішальні правила для визначення в режимі екзамену належності реалізації $x^{(j)}$, що розпізнається, наприклад, класу X_m^0 мають вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} & (\forall x^{(j)} \in \mathfrak{R}^{|M|}) (\forall X_m^0 \in \mathfrak{R}^{|M|}) \\ & \text{if } R_m^{\hat{a}i} < d[x_m \oplus x^{(j)} < R_m^{c\hat{a}}] \end{aligned} \right\}$$

then $x^{(j)} \in X_m^0$ else $x^{(j)} \notin X_m^0$,

де $d[x_m \oplus x^{(j)}]$ – кодова відстань між реалізацією $x^{(j)}$ і усередненим вектором x_m , вершина якого визначає центр розсіювання реалізацій;

\oplus – символ операції складання за модулем два.

Таким чином, ідея вищенаведеного алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань полягає в цілеспрямованому наближенні інформаційного критерію (2) до його максимального граничного значення.

Результати чисельного моделювання. Інформаційний синтез системи контролю знань проводився за навчальною матрицею, сформованою за результатами машинного контролю знань з навчальної дисципліни «Теорія і методи прийняття рішень», яка викладається студентам Сумського державного університету спеціальності «Комп’ютерні науки». При цьому кількість ознак розпізнавання в реалізаціях класів розпізнавання дорівнювала $N = 27$, що відповідає кількості тестових завдань. Алфавіт класів розпізнавання складався з чотирьох класів: клас X_5^0 , який характеризувався оцінкою «відмінно»; клас X_4^0 – «добре»; клас X_3^0 – «задовільно» і клас X_2^0 – «незадовільно».

На рис. 2 показано одержаний в процесі паралельної оптимізації графік залежності усередненого за алфавітом класів розпізнавання критерію (10) від параметра δ поля контрольних допусків. Тут і далі заштрихованими ділянками позначено робочі області визначення функції критерію, в яких здійснюється пошук його максимального значення. При цьому обчислення критерію оптимізації здійснювалося при заданих параметрах: $n_{\min} = 40$ і $r = 2$.

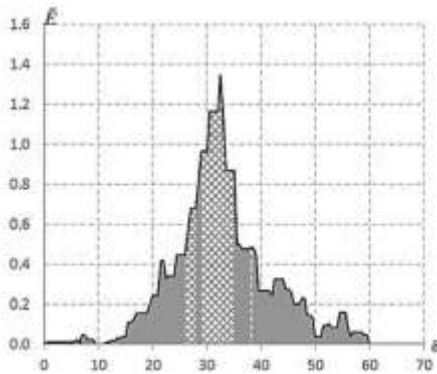


Рис. 2. Графік залежності усередненого інформаційного критерію від параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання

Аналіз рис. 2 показує, що при максимальному усередненому критерію $\bar{E}_{\max} = 1,35$ оптимальне значення параметра δ дорівнює $\delta^* = 33$ градаціям столбальної оціночної шкали, якому відповідає оптимальний нижній контрольний допуск $A_{НК}^* = 0,67$ на ознаки розпізнавання.

На рис. 3 показано результати оптимізації геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання при оптимальному значенні параметра δ^* .

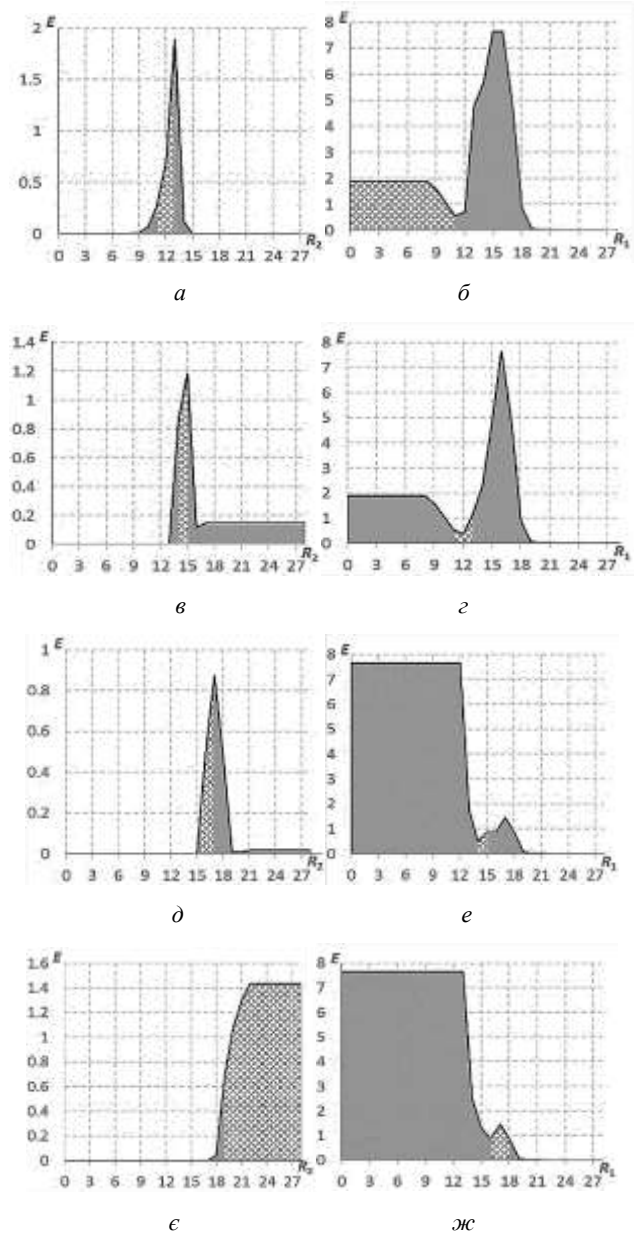


Рис. 3. Графіки залежності інформаційного критерію (10) від радіусів контейнерів класів розпізнавання:

- $a - R_2^{(5)}$ класу X_5^0 ; $b - R_1^{(5)}$ класу X_5^0 ; $в - R_2^{(4)}$ класу X_4^0 ;
- $г - R_1^{(4)}$ класу X_4^0 ; $д - R_2^{(3)}$ класу X_3^0 ; $e - R_1^{(3)}$ класу X_3^0 ;
- $ε - R_2^{(2)}$ класу X_2^0 ; $ж - R_1^{(2)}$ класу X_2^0 .

Аналіз результатів оптимізації показує, що оптимальними параметрами контейнера класу X_5^0 є зовнішній радіус $R_2^{(5)} = 13$ і внутрішній радіус $R_1^{(5)} = 0$; контейнера класу X_4^0 – зовнішній радіус $R_2^{(4)} = 15$ і внутрішній радіус $R_1^{(4)} = 13$; контейнера класу X_3^0 – зовнішній радіус $R_2^{(3)} = 17$ і внутрішній радіус $R_1^{(3)} = 15$; контейнера класу X_2^0 – зовнішній радіус $R_2^{(2)} = 22$ і внутрішній радіус $R_1^{(2)} = 17$.

Цим параметрам контейнерів відповідають такі значення інформаційного критерію оптимізації (10) і відповідні їм точнісні характеристики класифікаційних рішень, які приймаються за

навчальною матрицею: для класу X_5^0
 $E_{\max}^{(5)} = 1,89$ ($D_1 = 0,95$; $\beta = 0,23$); для класу X_4^0
 $E_{\max}^{(4)} = 1,18$ ($D_1 = 0,73$; $\beta = 0,13$); для класу X_3^0
 $E_{\max}^{(3)} = 0,87$ ($D_1 = 0,78$; $\beta = 0,25$); для класу X_2^0
 $E_{\max}^{(2)} = 1,43$ ($D_1 = 0,80$; $\beta = 0,15$).

Таким чином, аналіз показує, що синтезована система контролю знань не є безпомилковою, а її усереднена повна ймовірність правильного прийняття рішень за навчальною матрицею дорівнює $\bar{P}_t = 0,81$.

Для підвищення функціональної ефективності машинного навчання було реалізовано алгоритм (11) послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

На рис. 4 показано результати оптимізації параметрів навчання за послідовним алгоритмом.

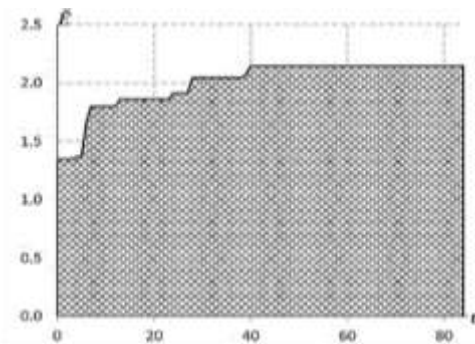


Рис. 4. Графік зміни усередненого інформаційного критерію при послідовній оптимізації

Аналіз рис. 4 показує, що вже на другому прогоні алгоритму (11) значення усереднений критерій досягає свого максимального значення $\bar{E}_{\max} = 2,15$.

На рис. 5 показано результати оптимізації геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання.

Аналіз результатів оптимізації (рис. 5) показує, що оптимальними параметрами контейнера класу X_5^0 є зовнішній радіус $R_2^{(5)} = 13$ і внутрішній радіус $R_1^{(5)} = 0$; контейнера класу X_4^0 – зовнішній радіус $R_2^{(4)} = 15$ і внутрішній радіус $R_1^{(4)} = 13$; контейнера класу X_3^0 – зовнішній радіус $R_2^{(3)} = 17$ і внутрішній радіус $R_1^{(3)} = 15$; контейнера класу X_2^0 – зовнішній радіус $R_2^{(2)} = 22$ і внутрішній радіус $R_1^{(2)} = 17$.

Цим параметрам контейнерів відповідають такі значення інформаційного критерію оптимізації (10) і відповідні їм точнісні характеристики класифікаційних рішень, які приймаються за навчальною матрицею: для класу X_5^0
 $E_{\max}^{(5)} = 2,06924$ ($D_1 = 0,93$; $\beta = 0,17$), для класу X_4^0
 $E_{\max}^{(4)} = 1,43332$ ($D_1 = 0,80$; $\beta = 0,15$), для класу X_3^0
 $E_{\max}^{(3)} = 2,06924$ ($D_1 = 0,90$; $\beta = 0,15$), для класу X_2^0
 $E_{\max}^{(2)} = 3,00828$ ($D_1 = 0,88$; $\beta = 0,03$).

Таким чином, у процесі оптимізації параметрів машинного навчання синтезовано систему контролю знань, усереднена повна ймовірність прийняття правильних рішень якої складає $\bar{P}_t = 0,88$.

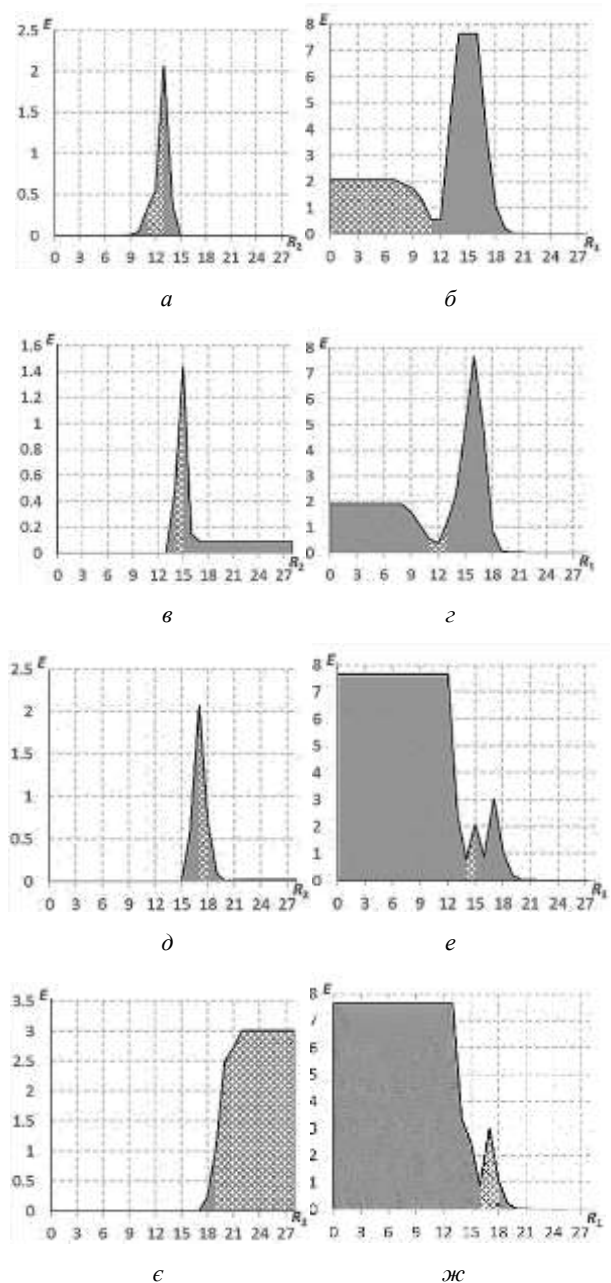


Рис. 5. Графіки залежності інформаційного критерію (10) від геометричних параметрів вкладених контейнерів класів розпізнавання: а – $R_2^{(5)}$ класу X_5^0 ; б – $R_1^{(5)}$ класу X_5^0 ; в – $R_2^{(4)}$ класу X_4^0 ; г – $R_1^{(4)}$ класу X_4^0 ; д – $R_2^{(3)}$ класу X_3^0 ; е – $R_1^{(3)}$ класу X_3^0 ; ж – $R_2^{(2)}$ класу X_2^0 ; з – $R_1^{(2)}$ класу X_2^0 .

Висновки. Запропоновано алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання системи контролю знань з вкладеними контейнерами класів розпізнавання, Побудовані в процесі машинного навчання вирішальні правила забезпечують у режимі екзамену, повну ймовірність правильного прийняття рішень, наближену до достовірності висококваліфікованого викладача. Оскільки побудовані вирішальні правила є не безпомилковими за навчальною матрицею, то в перспективі необхідно збільшити глибину машинного навчання шляхом оптимізації інших параметрів, які впливають на функціональну ефективність системи.

Список літератури

1. Гриценко В. И., Кудрявцева С. П., Колос В. В., Веренич Е. В. *Дистанционное обучение: теория и практика*. Київ: Наукова думка, 2004. 375 с.
2. Lubchak V. A., Petrov S. A. Estimation of functional efficiency of multiagent intellectual system of classification management of distance learning. *Informational Technologies and Management: Theses of 3rd International Conference, 14–15 April 2005*. Riga, Latvia: Information Systems Management Institute, 2005. P. 73.
3. Melo-Pinto P., Kim T., Atanassov K., Sotirova E., Shannon A., Krawczak M. Generalized net model of e-learning evaluation with intuitionistic fuzzy estimations. *Representation and Processing of Uncertain and Imprecise Information*. Warszawa, 2005. pp. 241–249.
4. Huang M. J., Huang H. S., Chen M. Y. Constructing a personalized e-Learning system based on genetic algorithm and case-based reasoning approach. *Expert Systems with Applications*. 2007. Vol. 33. P. 551–564.
5. Angelova G., Kalaydjiev O., Strupchanska A. Domain Ontology as a Resource Providing Adaptivity in eLearning. *In Proc. On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: OTM 2004 Workshops, LNCS 3292*. Cyprus, 2004. P. 700–712.
6. Rudolf Kruse, Christian Borgelt, Christian Moewes, Klawonn F., Matthias Steinbrecher, Pascal Held. *Computational intelligence: a methodological introduction*. London; New York, Springer Publ., 2013. 490 p.
7. Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014. 449 p.
8. Baylari Ahmad, Montazer Gh. A. Design a personalized e-learning system based on item response theory and artificial neural network approach. *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 36, pp. 8013–8021.
9. Francis T. S. Yu, Edward H. Yu, Ann G. Yu. *The Art of Learning: Neural Networks and Education*. CRC PressINC, 2018. 96 p.
10. James D. Miller. *Statistics for Data Science: Leverage the power of statistics for Data Analysis, Classification, Regression, Machine Learning and Neural Networks*. Packt Publ. Ltd, 2017. 286 p.
11. Довбиш А. С. *Основи проектування інтелектуальних систем: навч. посіб.* Суми: СумДУ, 2009. 171 с.
12. Довбиш А. С. *Інтелектуальні інформаційні технології в електронному навчанні*. Суми: СумДУ, 2013. 172 с.
13. Dovbysh A. S., Moskalenko V. V., Rizhova A. S. Information-Extreme Method for Classification of Observations with Categorical Attributes. *Cibernetica and Systems Analysis*. 2016, vol. 52, no. 2. P. 45–52.
14. Довбиш А. С., Любчак В. О., Петров С. О. Машинна оцінка знань студентів у системах керування дистанційним навчанням. *Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки»*. 2007. № 1. С. 167–178.
15. Lubchak V. A., Petrov S. A. Estimation of functional efficiency of multiagent intellectual system of classification management of distance learning. *Informational Technologies and Management: Theses of 3rd International Conference, 14–15 April 2005*. Riga, Latvia: Information Systems Management Institute Publ., 2005, p. 73.
16. Melo-Pinto P., Kim T., Atanassov K., Sotirova E., Shannon A., Krawczak M. Generalized net model of e-learning evaluation with intuitionistic fuzzy estimations. *Representation and Processing of Uncertain and Imprecise Information*, Warszawa, 2005, pp. 241–249.
17. Huang M. J., Huang H. S., Chen M. Y. Constructing a personalized eLearning system based on genetic algorithm and case-based reasoning approach. *Expert Systems with Applications*. 2007, vol. 33, pp. 551–564.
18. Angelova G., Kalaydjiev O., Strupchanska A. Domain Ontology as a Resource Providing Adaptivity in eLearning. *In Proc. On the Move to Meaningful Internet Systems 2004: OTM 2004 Workshops, LNCS 3292*. Cyprus, 2004, pp. 700–712.
19. Rudolf Kruse, Christian Borgelt, Christian Moewes, Klawonn F., Matthias Steinbrecher, Pascal Held. *Computational intelligence: a methodological introduction*. London; New York, Springer Publ., 2013. 490 p.
20. Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press, 2014. 449 p.
21. Baylari Ahmad, Montazer Gh. A. Design a personalized e-learning system based on item response theory and artificial neural network approach. *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 36, pp. 8013–8021.
22. Francis T. S. Yu, Edward H. Yu, Ann G. Yu. *The Art of Learning: Neural Networks and Education*. CRC PressINC, 2018. 96 p.
23. James D. Miller. *Statistics for Data Science: Leverage the power of statistics for Data Analysis, Classification, Regression, Machine Learning and Neural Networks*. Packt Publ. Ltd, 2017. 286 p.
24. Dovbysh A. S. *Osnovy proektuvannya intelektualnykh system: Navchalnyy posibnyk [Fundamentals of Designing Intelligent Systems: Textbook]*. Sumy, SumDU Publ., 2009. 171 p.
25. Dovbysh A. S. *Intelektualni informatsiyni tekhnologii v elektronnomu navchanni [Intelligent Information Technologies in Electronic Learning]*. Sumy, SumDU Publ., 2013. 172 p.
26. Dovbysh A. S., Moskalenko V. V., Rizhova A. S. Information-Extreme Method for Classification of Observations with Categorical Attributes. *Cibernetica and Systems Analysis*. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 45–52.
27. Dovbysh A. S., Lyubchak V. O., Petrov S. O. Mashynna otsinka znan studentiv u systemakh keruvannya dystantsiynym navchannya [Machine assessment of knowledge of students in distance learning management systems]. *Visnyk Sum'koho derzhavnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» [Herald of Sumy State University. Series «Technical sciences»]*. 2007, no. 1, pp. 167–178.

References (transliterated)

1. Gritsenko V. I., Kudryavtseva S. P., Kolos V. V., Verenich E. V. *Distantionnoye obucheniye: teoriya i praktika [Distance learning: theory and practice]*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 2004. 375 p.

Надійшла (received) 05.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелехов Ігор Володимирович (Шелехов Игорь Владимирович, Shelehov Ihor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри комп'ютерних наук; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4304-7768>; e-mail: i.shelehov@cs.sumdu.edu.ua

Пилипенко Світлана Олександрівна (Пилипенко Светлана Александровна, Pylypenko Svitlana Oleksandrivna) – Сумський державний університет, аспірант кафедри комп'ютерних наук; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0978-9602>; e-mail: s.pylypenko@media.sumdu.edu.ua

Столярчук Олексій Олександрович (Столярчук Алексей Александрович, Stolyarchuk Oleksiy Oleksandrovych) – Сумський державний університет, аспірант кафедри комп'ютерних наук; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8705-5458>; e-mail: green.red.tiger@gmail.com

Романенко Тимофій Андрійович (Романенко Тимофей Андреевич, Romanenko Tymofiy Andriyovych) – Сумський державний університет, студент; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6288-4831>; e-mail: tima5420237@gmail.com

О. Ю. ЧЕРЕДНІЧЕНКО, О. В. ІВАЩЕНКО, Ю. М. ГОНТАР, Б. М. ВОРОНА

ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОПОЗИЦИЙ ТОВАРИВ НА ОСНОВИ КОНТЕКСТНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Интернет-технології є невід'ємною складовою відносин, які виникають у сучасному суспільстві. Через швидке впровадження та зручність електронних майданчиків, прогнозовано зростає попит на ринку IT-продуктів для рекомендаційних систем. У статті розглянуті різноманітні обмеження поточних рекомендаційних методів та обговорено можливі розширення, що можуть покращити рекомендаційні можливості та зробити їх більш цінними для широкого кола додатків. Ці розширення включають покращення сприймання користувачів та елементів, включення контекстної інформації в рекомендаційний процес, підтримка багатокритеріальних рейтингів та надання більш гнучких і водночас менш нав'язливих типів рекомендацій. Важливу роль відіграє інтеграція діяльності, яка полягає у підтримці усіх аспектів електронної комерції від виконання транзакцій до підтримки мережі постачання, що дає змогу спростити документообіг та збільшити вигоду учасників. Направленість даної розробки – проводити аналітичну обробку даних торговельних майданчиків, на основі контекстних рекомендацій, об'єктивний аналіз та здійснювати актуальний моніторинг ділової активності на торговельному майданчику. Розглянуто задачу складання різноманітних аналітичних звітів, що дозволить учасникам ринку IT-продуктів для рекомендаційних систем об'єктивно і своєчасно аналізувати розвиток ситуації на ринку, виявляти існуючі та прогнозні тенденції. Побудова сфери надання інтелектуальних аналітичних послуг здійснюється для залучення додаткових учасників, або якісно нових гравців ринку та одержання додаткового прибутку. Для обробки доцільно використовувати принципово нові технології Data Mining, що дозволить отримати якісно цінні дані. Data Mining – це технологія, призначена для пошуку у великих інформаційних масивах неочевидних даних, об'єктивних, корисних на практиці закономірностей.

Ключові слова: електронні торговельні майданчики, рекомендаційні системи, контекстна інформація, інтерпретація даних, моделі, програмний компонент, інтелектуальний аналіз даних.

О. Ю. ЧЕРЕДНІЧЕНКО, О. В. ІВАЩЕНКО, Ю. М. ГОНТАР, Б. М. ВОРОНА

ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ТОВАРОВ НА ОСНОВЕ КОНТЕКСТНЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Интернет-технологии являются неотъемлемой составляющей отношений, возникающих в современном обществе. Быстрое внедрение и удобство электронных площадок спровоцировало прогнозируемый рост спроса на рынке IT-продуктов для рекомендательных систем. В статье рассмотрены различные ограничения текущих рекомендательных методов и обсуждены возможные расширения, которые могут улучшить рекомендательные возможности и сделать их более ценными для широкого круга приложений. Эти расширения включают улучшение восприятия пользователей и элементов, включение контекстной информации в рекомендательный процесс, поддержка многокритериальных рейтингов и предоставления более гибких и одновременно менее навязчивых типов рекомендаций. Важную роль играет интеграция деятельности, которая заключается в поддержке всех аспектов электронной коммерции от выполнения транзакций до поддержки сети поставок, что позволяет упростить документооборот и увеличить выгоду участников. Направленность данной разработки – проводить аналитическую обработку данных торговых площадок, на основе контекстных рекомендаций, объективный анализ и осуществлять актуальный мониторинг деловой активности на торговой площадке. Рассмотрена задача составления разнообразных аналитических отчетов, что позволит участникам рынка IT-продуктов для рекомендательных систем объективно и своевременно анализировать развитие ситуации на рынке, выявлять существующие и прогнозны тенденции. Построение сферы предоставления интеллектуальных аналитических услуг осуществляется для привлечения дополнительных участников, или качественно новых игроков рынка и получения дополнительной прибыли. Для обработки целесообразно использовать принципиально новые технологии Data Mining, что позволит получить качественно ценные данные. Data Mining – это технология, предназначенная для поиска в больших информационных массивах неочевидных данных, объективных, полезных на практике закономерностей.

Ключевые слова: электронные торговые площадки, рекомендательная система, контекстная информация, интерпретация данных, модели, программный компонент, интеллектуальный анализ данных.

O. Y. CHEREDNICHENKO, O. V. IVASHCHENKO, Y. M. GONTAR, B. M. VORONA

DATA MINING OF COMMODITY PROPOSALS BASED ON CONTEXT RECOMMENDATIONS

Internet technologies are an integral part of the relationship that arises in modern society. The rapid introduction and convenience of electronic platforms triggered the projected growth in demand in the market for IT products for recommender systems. The article discusses various limitations of current recommender methods and discusses possible extensions that can improve the recommender capabilities and make them more valuable for a wide range of applications. These extensions include improving the perception of users and elements, including contextual information in the recommendatory process, supporting multi-criteria ratings and providing more flexible and at the same time less intrusive types of recommendations. When integrating the relevant information technology to develop a commodity proposals environment, it is therefore necessary to consider the personalization requirements of the proposal to ensure that the technology achieves its intended result. This study therefore sought to apply context aware technology and recommendation algorithms to develop a system realize personalized goals in a context aware manner and improve commodity proposals effectiveness. In order to offer context-aware and personalized information, intelligent processing techniques are necessary. Different initiatives considering many contexts have been proposed, but users preferences need to be learned to offer contextualized and personalized services, products or information. Therefore, this paper proposes an agent-based architecture for context-aware and personalized event recommendation based on ontology and the spreading algorithm. The use of ontology allows to define the domain knowledge model, while the spreading activation algorithm learns user patterns by discovering user interests. Also from the statistical observation, it is found that there exists a higher level agreement towards the system between the participants of both end users and experts.

Keywords: electronic market places, recommender system, context information, data interpretation, model, software component, data mining.

Вступ. Останнім часом ринок електронної секторі. Українські компанії все частіше купують комерції в Україні активно розвивається, причому не товари та послуги на електронних торговельних тільки в споживацькому, але й у корпоративному майданчиках (ЕТП). З впровадженням у дію Закону

України «Про здійснення державних закупівель», який оголошує обов'язкове проведення всіх державних закупівель у електронній формі, очікується, що обсяги ринку ЕТП зростуть в кілька разів. Зарано декларувати швидке та повне переміщення підприємств із паперової форми закупок до електронної, але все ж у найближчій перспективі в Україні корпоративний сектор стане так само активним в електронній комерції, як і споживачі.

Загалом, електронна комерція розвивається в чотирьох напрямках:

1. C2C (customer to customer – споживач для споживачів) системи електронної торгівлі між приватними особами (наприклад, сайт-дошка оголошень Slando.ua).
2. B2C (business to customer – бізнес для споживачів) – електронні майданчики для споживачів, тобто онлайн магазини, в яких кожен з нас купує товари масового попиту, побутову техніку.
3. B2B (business to business – бізнес для бізнесу) – електронні майданчики, на яких постачальники і закупівельники можуть вести торгово-закупівельну діяльність, купуючи товари, роботи і послуги для потреб компанії, починаючи від оргтехніки і закінчуючи важким металургійним обладнанням.
4. B2G (business to government – бізнес для держави) – електронні майданчики, на яких державні установи можуть здійснювати закупівлі відповідно до законодавства про держзакупівлі, купуючи товари, роботи і послуги для потреб державного сектору.

На ринку України представлені такі види електронних майданчиків:

- Незалежні електронні торгові майданчики. Пропонують проводити електронні торги на їх платформі, надаючи певний функціонал.
- Внутрішньо корпоративні електронні торгові майданчики. Деякі компанії організують власні електронні майданчики (як приклад можна привести торговий майданчик компанії ДТЕК – tenders.dtek.com).

Корпоративні майданчики зручні для роботи конкретного підприємства, оскільки враховують всю специфіку його закупівельної діяльності. Що ж стосується незалежних ЕТМ, то завдяки запропонованій індивідуальній системі налаштувань, практично будь-яке підприємство може працювати на незалежній ЕТМ, не обмежуючи себе в функціоналі.

Переваги, які надаються користувачам системами електронної торгівлі:

1. Електронні торгові майданчики зазвичай надають відкритий доступ до баз даних організацій і торгових процедур. Це дає можливість швидко знайти необхідну інформацію про контрагентів, конкурентів, торгові процедури, ціни і т. п., а також швидко і репрезентативно провести маркетингові дослідження.

2. Реєстрація в системі означає розміщення інформації про вашу організацію (реквізити, контакти, сайт), про пропоновану вами продукцію і (або) послуги (з малюнками, фотографіями та ін.). Це дозволяє без особливих витрат проводити масштабну рекламну кампанію по їх просуванню.
3. Зазвичай надається можливість підписатися на профільну розсилку і отримувати по електронній пошті повідомлення про цікаві процедури.
4. Організація може брати участь в різних процедурах будь-якого рівня складності (конкурентні переговори, запити цін / пропозицій, аукціони покупця / продавця, різні види конкурсів).
5. Зазвичай надається безкоштовний доступ до документації в електронному вигляді по всіх торгових процедурах.
6. Скорочення витрат на участь в торгових процедурах.
7. Мінімізація паперового документообігу (документи формуються в електронному вигляді і підписуються електронним цифровим підписом).
8. Значне розширення ринків збуту (зняття географічних бар'єрів) веде до значного збільшення продажів.
9. Системи надають зручні сервіси для ефективної роботи (отримання електронного цифрового підпису, банківської гарантії, експрес-кредитування на внесення забезпечення заявок, послуги страхування, розрахунок логістики, переклад на іноземні мови та ін.).

Через швидке впровадження та зручність електронних майданчиків, прогнозовано зростає попит на ринку ІТ-продуктів для рекомендаційних систем, які стали важливою областю досліджень з моменту появи перших документів про спільну фільтрацію в середині 1990-х років [1]. Інтерес до цієї області все ще залишається високим, оскільки вона являє собою багатопроблемну область досліджень і має велику кількість практичних застосувань, які допомагають користувачам справлятися з перевантаженням інформацією та надавати персоналізовані рекомендації, зміст та послуги для них. Приклади таких програм включають рекомендації книг, компакт-дисків та інших продуктів на Amazon.com, фільмів MovieLens та новин VERSIFI Technologies (раніше AdaptiveInfo.com) [2]. Крім того, деякі постачальники включили можливість рекомендацій у свої комерційні сервери [3].

Однак, незважаючи на всі ці досягнення, існуюче покоління рекомендаційних систем все ще потребує додаткових покращень, щоб зробити методи рекомендацій більш ефективними та застосовуваними до ще більш широкого спектру додатків у реальному житті, включаючи рекомендації щодо відпусток, певних видів фінансових послуг для інвесторів, та продуктів для покупки в магазині, які створені "розумним" кошиком [4]. Ці вдосконалення включають в себе кращі методи представлення поведінки користувачів

та інформації про рекомендовані елементи, більш просунуті методи моделювання рекомендацій, включення різноманітної контекстної інформації в процес рекомендації, використання багатокритеріальних рейтингів, розробка менш нав'язливих та більш гнучких методів рекомендацій, які також покладаються на заходи, які більш ефективно визначають ефективність рекомендаційних систем.

Об'єктом даного дослідження є процес розширення можливостей рекомендаційних систем. Рекомендаційні системи можуть бути розширені кількома способами, які включають в себе поліпшення розуміння користувачів і елементів, включення контекстної інформації в процес рекомендації, підтримку оцінок з множинними критеріями і надання більш гнучких і менш нав'язливих рекомендацій. Такі більш всеосяжні моделі рекомендаційних систем можуть забезпечити найкращі рекомендації.

Дослідження існуючих рішень проблем. За останні кілька років було проведено велику кількість досліджень на тему рекомендаційних технологій, які використовували широкий спектр статистичних методів, машинного навчання, пошуку інформації та інших, які значно просунули сучасний рівень в порівнянні з ранніми рекомендаційними системами, що використовують спільну та контентно-орієнтовану евристику. Рекомендаційні системи можуть бути класифіковані наступним чином:

- контентно-орієнтовані, колаборативні, гібридні, засновані на використовуваних рекомендаційних підходах
- евристичні або модельні, засновані на основних типах методів рекомендації, які використовуються для оцінки рейтингу.

Ці два ортогональних аспекти для класифікації рекомендаційних систем представлено в табл. 1.

Проте як колаборативні, так і контентно-орієнтовані методи мають певні обмеження. Більш того, для того, щоб забезпечити кращі рекомендації та мати можливість використовувати рекомендаційні системи в набагато більш складних типах програм, таких як рекомендації щодо відпусток чи певних видів фінансових послуг, більшість методів, розглянутих у цьому розділі, потребують значного розширення. Наприклад, навіть для традиційної програми рекомендацій фільму [3] показано, що розширивши традиційний підхід до спільного використання фільтрів на основі пам'яті, враховуючи контекстну інформацію, таку як, коли, де і з ким було побачено фільм, результати рекомендаційної системи можуть перевершити чистий традиційний метод колаборативного фільтрування. Багато реалістичних рекомендаційних додатків, в тому числі декілька ділових додатків, є, напевно, більш складними, ніж система, що рекомендує фільм, і вимагають урахування інших факторів у розгляді рекомендацій. Тому необхідність розробки більш просунутих методів рекомендації ще більш актуальна для таких типів додатків.

Всебічне розуміння користувачів та елементів.

Як зазначалося в [2], [3], [4], більшість рекомендаційних методів дають оцінки, засновані на обмеженому

розумінні користувачів і елементів, які враховуються в профілях користувачів і елементів, і не приймають повну перевагу інформації в транзакційних історіях користувача та інших доступних даних. Незважаючи на певний прогрес, досягнутий при впровадженні профілів користувачів і позицій в деякі з більш ранніх методів рекомендацій, ці профілі все ще мають тенденцію бути досить простими і не використовують деякі з більш просунутих методів профілювання. На додаток до використання традиційних функцій профілю, таких як ключові слова і прості демографічні дані користувача, більш просунуті методи профілювання, засновані на правилах інтелектуального аналізу даних, послідовності і підписів які описують інтереси користувача, можуть використовуватися для створення профілів користувачів. Крім того, на додаток до використання традиційних функцій профілю елементів, таких як ключові слова, аналогічні передові методи профілювання також можуть використовуватися для створення всеосяжних профілів елементів. Що стосується рекомендаційних систем, то сучасні методи профілювання, засновані на інтелектуальному аналізі даних, використовуються головним чином в контексті аналізу використання Інтернет, тобто для виявлення навігаційних шаблонів використання Інтернету (послідовності перегляду сторінок) користувачами, щоб забезпечити найкращі рекомендації веб-сайтів; однак такі методи не набули широкого поширення в рейтингових системах [5].

Після створення профілів користувачів і елементів найбільш загальна функція оцінки рейтингів може бути визначена в термінах цих профілів і раніше заданих рейтингів наступним чином:

Нехай профіль користувача визначається як вектор функції p , тобто $C_i = (a_{i1}, \dots, a_{ip})$. Крім цього, нехай профіль елемента j визначається як вектор r ознак, тобто $S_j = (b_{j1}, \dots, b_{jr})$. окрім цього, нехай C – вектор усіх профілів користувачів, тобто $C = (C_1, \dots, C_m)$, і нехай S – вектор всіх профілів елементів, тобто $S = (S_1, \dots, S_n)$. Тоді найбільш загальну процедуру оцінки рейтингу можливо визначити так:

$$r'_{ij} = \begin{cases} r_{ij}, & \text{if } r_{ij} \neq \emptyset, \\ u_{ij}(R, c, s), & \text{if } r_{ij} = \emptyset. \end{cases} \quad (1)$$

Ця процедура оцінює кожну невідому оцінку $r'_{ij} = u_{ij}(R, c, s)$ у термінах відомих оцінок $R = \{r_{ij} \neq \emptyset\}$, профілів користувачів C і профілів елементів S . Ми можемо використовувати гнучкі методи для оцінки функції корисності u_{ij} , включаючи різні евристики, найближчі класифікатори, дерева рішень, гнучкі методи, радіальні базові функції, регресії, нейронні мережі і методи реляційного навчання (оскільки C і S можуть бути матрицями або реляційними таблицями) [6]. Більш того, ми хотіли б відзначити, що (1) представляє найбільш загальну модель, яка залежить від цілого діапазону входів, включаючи характеристики користувача (C_i) і можливих інших користувачів $C = (C_1, \dots, C_m)$, характеристики S_j елемента j й, можливо,

Таблиця 1 – Класифікація рекомендаційних систем

Рекомендаційний підхід	Рекомендаційна техніка	
	Евристична основа	На основі моделі, яка зазвичай використовується
На основі вмісту	<p>Методи, що зазвичай використовуються:</p> <ul style="list-style-type: none"> • TF-IDF (пошук інформації) • Кластеризація <p>Репрезентація дослідницьких прикладів:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lang, 1995 • Balabanovic & Shoham, 1997 • Pazzani & Billsus, 1997 	<p>Баєсівські класифікатори</p> <ul style="list-style-type: none"> • Кластеризація • Рішення дерев • Штучні нейронні мережі <p>Приклади репрезентативних досліджень:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parzani & Billsus, 1997 • Mooneyetal, 1998 • Mooney&Roy, 1999 • Billsus&Pavan, 1999
Спільна робота	<p>Методи, що зазвичай використовуються:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Найближчий сусід (косинус кореляція) • Кластеризація • Теорія графів <p>Приклади репрезентативних досліджень:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resnicketal, 1994 • Hilleetal, 1995 • Shardanand & Maccs, 1995 • Breeseetal, 1998 • Nakamura & Abc, 1998 • Aggarwaleaal, 1999 • Delgado & Ishii, 1999 • Pennock & Horwitz, 1999 • Sarwaretal, 2001 	<p>Методи, що зазвичай використовуються:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Найближчий сусід (косинус кореляція) • Кластеризація • Теорія графів <p>Приклади репрезентативних досліджень:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Billsus & Pazzani, 1998 • Breeseeta, 1998 • Ungar & Foster, 1998 • Chien & George, 1999 • Getoor & Sahami, 1999 • Pennock & Horwitz, 1999 • Goldbergetal, 2001 • Kumaretal, 2001 • Pavlov & Pennock, 2002 • Shanietal, 2002 • Vuetal, 2002, 2004 • Hofmann 2003, 2004 • Marlin, 2003
Гібридна модель	<p>Поєднання компонентів на основі вмісту та спільних компонентів за допомогою:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Лівійна комбінація прогнозованих оцінок • Різні схеми голосування • Включення одного компоненту у складі <p>Евристичні методи для інших дослідницьких прикладів дослідження:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Balabanovic & Shoham, 1997 • Claypooletal, 1999 • Good CI al. 1999 • Pazani, 1999 • Billsus & Pazzani, 2000 • Iran & Cohen, 2000 • Melvilleetal, 2002 	<p>Поєднання компонентів на основі вмісту та спільної роботи:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Включення одного компоненту у вигляді панорами моделі для іншого • Побудова однієї об'єднуючої моделі <p>Репрезентативні дослідження:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Basualal, 1998 • Condliffetal, 1999 • Soboroff & Nicholas, 1999 • Ansarictal, 2000 • Popesculetal, 2001 • Scheinetal, 2002

інші елементи $S = (S_1, \dots, S_n)$, рейтинги (переваги) R_i , виражені користувачем i , і рейтинги (переваги), виражені усіма іншими користувачами $R = \{r_{ij} \neq \emptyset\}$. Таким чином, функція u_{ij} явно включає в себе спільні, засновані на контенті і гібридні методи. Однак більшість існуючих рекомендаційних систем роблять функцію u_{ij} залежною тільки від малої підмножини всього вхідного простору R, c, s . Наприклад, функція u_{ij} для традиційних методів спільної фільтрації на основі пам'яті не залежить від входів C і S , і обмежує R тільки стовпчиком R_j і зазвичай тільки для множини N найближчих сусідів r_{ij} для стовпця R_j^2 .

Цікавим завданням дослідження було б розширити профілі на основі атрибутів, як визначено C і S ,

для використання більш складних методів профілювання, описаних вище, таких як правила, послідовність і методи на основі сигнатур.

Розширення для рекомендаційних технік на основі моделі. Деякі з підходів, заснованих на моделях, забезпечують суворі методи рейтингової оцінки з використанням різних методів статистичного і машинного навчання. Однак інші області математики та інформатики, такі як теорія математичного наближення [8], можуть також сприяти розробці кращих рейтингових методів оцінки, які визначаються формулою (1). Одним із прикладів підходу на основі апроксимації до визначальною функції u_{ij} в (1) є радіальні базисні функції, які визначаються наступним чином: дано множину точок $X = \{x_i, \dots, x_m\}$ (де $x_i \in IR^N$) і

значення невідомої функції f (наприклад, рейтингової функції) в цих точках, тобто $f(x_1), \dots, f(x_m)$ радіальна базисна функція $r_{f,x}$ оцінює значення f в усьому IR^N , враховуючи $r_{f,x}(x_i) = f(x_i)$ для всіх $i = 1, \dots, m$, як

$$r_{f,x}(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi(\|x - x_i\|), \quad (2)$$

де функція, яка задовольняє вимогам

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_i \alpha_j \varphi(\|x_i - x_j\|) > 0 \quad (3)$$

для всіх різних точок в та всіх коефіцієнтів.

Тоді відома теорема [6] стверджує, що якщо φ є додатно визначеною функцією, то існує єдина функція виду (2), що задовольняє умовам для всіх. Деякі популярні приклади функцій:

1. $\varphi(r) = r^\beta$, де $\beta > 0$ додатне непарне число;
2. $\varphi(r) = r^k \log(r)$, де $k \in IN$ (тонка сплайн-поверхня);
3. $\varphi(r) = e^{1-\alpha r^2}$, де $\alpha > 0$ (Гаус).

Однією з переваг радіальних базисних функцій є те, що вони широко вивчені в теорії наближень, а їх теоретичні властивості та використання радіальних базисних функцій у багатьох практичних застосуваннях були добре зрозумілими [6], [7]. Тому було б цікаво застосувати їх до оцінки невідомих рейтингів у рекомендаційних системах.

Одне з попереджень з використанням радіальних базисних функцій у рекомендаційних системах полягає в тому, що простір рекомендацій $C \times S$ зазвичай не представляє N -вимірний евклідовий простір. Тому однією дослідницькою задачею є розповсюдження радіальних базисних методів від реальних чисел до інших доменів та їх застосування до проблем рекомендаційних систем. Застосовність інших методів апроксимації для оцінки в (1) представляє ще одну цікаву тему дослідження.

Багатомірність рекомендацій. Нинішнє покоління рекомендаційних систем діє в двовимірному просторі. Тобто вони роблять свої рекомендації тільки на основі інформації про користувачів, елементи і не враховують додаткову контекстну інформацію, яка може мати вирішальне значення в деяких додатках. Однак, у багатьох ситуаціях, корисність певного продукту для користувача може значно залежати від часу (наприклад, пори року, сезону, місяцю або дня тижня). Це може також залежати від людини, з якою продукт буде споживатися або ділитися, і за яких обставин. У таких ситуаціях може бути недостатньо просто рекомендувати користувачам елементи; система рекомендацій повинна приймати до уваги при рекомендації продукту додаткову контекстну інформацію, таку як час, місце і компанія користувача. Наприклад, рекомендуючи пакет відпустки, система повинна також

враховувати пору року, яким користувач планує подорожувати, умови поїздки та обмеження на той момент і іншу контекстну інформацію.

Як інший приклад, користувач може мати істотно різні переваги у фільмах, які він хоче побачити, коли виїжджає до кінотеатру з другом в суботу ввечері, і тих, які планує дивитись вдома з батьками ввечері середі.

Як стверджувалося в [9] і [10], важливо розширити традиційні двовимірні й Користувач \times Елемент рекомендаційні методи для багатовимірних налаштувань. Крім того, включення знань про завдання користувача в алгоритм рекомендації в певних програмах може привести до кращих рекомендацій.

Щоб взяти до уваги контекстну інформацію, [2] пропонує визначити функцію корисності (або оцінок) над багатовимірним простором $D_1 \times \dots \times D_n$ (на відміну від традиційного двовимірного) як

$$u: D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow R. \quad (4)$$

Тоді проблема з рекомендаціями визначається вибором певних «що» вимірювань $D_{i1} \dots D_{ik} (k < n)$ і певних «для кого» вимірювань $D_{j1} \dots D_{jl} (l < n)$, які не перекриваються, тобто $\{D_{i1} \dots D_{ik}\} \cap \{D_{j1} \dots D_{jl}\} = \emptyset$, і рекомендують, для кожного набору $(d_{j1}, \dots, d_{jl}) \in D_{j1} \times \dots \times D_{jl}$, набір $(d_{i1}, \dots, d_{ik}) \in D_{i1} \times \dots \times D_{ik}$, який максимізує корисність $u(d_1, \dots, d_n)$, тобто

$$\forall (d_{j1}, \dots, d_{jl}) \in D_{j1} \times \dots \times D_{jl},$$

$$\begin{aligned} (d_{i1}, \dots, d_{ik}) &= \\ &= \operatorname{argmax}_{\substack{(d'_{i1}, \dots, d'_{ik}) \in D_{i1} \times \dots \times D_{ik} \\ (d'_{j1}, \dots, d'_{jl}) = (d_{j1}, \dots, d_{jl})}} u(d'_1, \dots, d'_n). \end{aligned}$$

Наприклад, в разі системи рекомендацій для фільму потрібно враховувати не тільки характеристики фільму d_1 і людини, яка хоче подивитися фільм d_2 , але також і таку контекстну інформацію, як:

- 1) d_3 : де і ким буде переглянуто фільм (наприклад, у кінотеатрі, вдома по телевізору, на відео або DVD),
- 2) d_4 : з ким буде переглянуто фільм (наприклад, поодиноці, з подругою / другом, друзями, батьками і т. д.),
- 3) d_5 : коли фільм буде переглянуто (наприклад, в будні дні або у вихідні дні, вранці / удень / увечері, в ніч відкриття і т. д.).

Як обговорювалося раніше, кожен з компонентів d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 можна визначити як вектор його характеристик і загальна корисна функція $u(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)$ може бути досить складною і враховувати різні ефекти взаємодії між векторами d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 .

Як стверджувалося в [11], багато двовимірних алгоритмів рекомендацій не можуть бути безпосередньо поширені на багатовимірний випадок. Крім того, пропонується підхід, заснований на рекомендаціях щодо скорочення, який використовує тільки рейтинги, які стосуються контексту зазначених користувачем

критеріїв, в яких робиться рекомендація. Наприклад, щоб рекомендувати фільм для людини, яка хоче побачити його в кінотеатрі в суботу ввечері, підхід, заснований на скороченні, буде використовувати тільки доступні рейтинги фільмів, які можна побачити в кінотеатрах у вихідні, якщо це визначено даними, що місце і час тижня впливають на поведінку кіноглядачів. Вибравши тільки рейтинги, які стосуються контекстної рекомендації, підхід, заснований на скороченні, проектує багатовимірний куб рейтингів за двома основними параметрами користувача і елемента. Потім для отримання рекомендації можна використовувати будь-який стандартний метод двовимірних рекомендацій. Оскільки ці рекомендації засновані тільки на контекстно-залежному наборі рейтингів, це зводиться до створення локальної моделі, що створює контекстні рекомендації.

Іншим можливим підходом до розробки багатовимірних рекомендацій було б розгортання ієрархічного баєсівського методу, представленого в [3], який може бути розширений з двох до багатовимірного випадку наступним чином: замість розгляду двовимірного випадку, як визначено в (1), де до характеристики користувача d_1 , які визначаються вектором \mathbf{z}_i , і характеристик елемента d_2 з вектором \mathbf{w}_j , ми також можемо додати контекстні розміри d_3, \dots, d_n , де $\mathbf{d}_i = (d_{i1}, \dots, d_{ix_i})$ – вектор характеристик розмірності D_i . Тоді функція $r = u(d_1, d_2, \dots, d_n)$ поширюється від (1) до лінійної комбінації d_1, d_2, \dots, d_n , і також включає ефекти взаємодії між цими розмірностями (тобто ефект взаємодії, який визначається матрицею $\{x_{ij}\}$ в (1), повинен бути розширеним). Одне із завдань дослідження – зробити ці розширення масштабованими при великих значеннях n .

Багатокритеріальні рейтинги. Більшість сучасних рекомендаційних систем відносяться до систем з одним рейтингом, такі як рейтинги фільмів і книг. Однак в деяких додатках, таких як рекомендації для ресторанів, край важливо включити рейтинги з декількома критеріями в рекомендації. Наприклад, багато путівники по ресторанах, такі як Zagat's Guide, надають три критерії для оцінки ресторанів: їжа, декор та обслуговування [12]. Хоча багатокритеріальні оцінки ще не були розглянуті в літературі по рекомендаційним системам, вони були широко вивчені в співтоваристві Operations Research [13]. Типові рішення проблем оптимізації багатокритеріальних задач:

1. Знайти оптимальні рішення Парето,
2. Взяти лінійну комбінацію декількох критеріїв і зменшити проблему до задачі оптимізації з одним критерієм,
3. Оптимізувати найважливіший критерій і перетворити інші критерії в обмеження;
4. Послідовна оптимізація одного критерію за раз, перетворення оптимального рішення в обмеження (обмеження) і повторення процесу для інших критеріїв.

Щоб проілюструвати, як деякі з цих методів можуть бути використані в рекомендаційних системах,

розглянемо застосування підходу 3 до проблеми рекомендації ресторанів r користувачеві s на основі критеріїв користувача з якості їжі $f_c(r)$, декору $d_c(r)$, і обслуговування $s_c(r)$. Ми можемо вважати якість їжі $f_c(r)$ основним критерієм і використовувати інші в якості обмежень, тобто ми хочемо знайти ресторани r , які максимізують $f_c(r)$, за умови, що обмеження $d_c(r) > \alpha_c$, і $s_c(r) > \beta_c$, де α_c і β_c – мінімальні рейтинги для декору і обслуговування (наприклад, користувач s не ходитиме в будь-який ресторан з оцінкою декору і обслуговування нижче 10, з можливих 30, незалежно від того, якої якості їжі там). Ця проблема ускладнюється тим фактом, що у нас зазвичай не буде оцінок декору $d_c(r)$ і обслуговування $s_c(r)$ для всіх ресторанів. Потім завдання системи рекомендацій полягає в тому, щоб оцінити невідомі оцінки $d'_c(r)$ і $s'_c(r)$ і, наприклад, використовуючи методи оцінки, і знайти всі ресторани r , що задовольняють обмеженням $d'_c(r) > \alpha_c$, і $s'_c(r) > \beta_c$. Як тільки ми знайдемо всі ресторани, що задовольняють обмеженням за цими оціночними рейтингами, ми можемо використовувати ці ресторани в пошуках максимуму $f_c(r)$. Однак, як і у випадку з оцінками відділів і сервісів, у нас можуть не бути рейтингів продуктів харчування $f_c(r)$ для всіх таких ресторанів $f_c(r)$ і, отже, також необхідно буде використовувати процедуру оцінки рейтингу перед тим, як робити будь-які рекомендації. Ми вважаємо, що процес знаходження оптимального набору Парето та ітеративного методу послідовних оптимізацій одного критерію для згаданих вище рекомендацій по множинним критикам також являє собою цікаві і складні проблеми.

Невтручання (nonintrusiveness). Багато рекомендаційних системи є нав'язливими в тому сенсі, що вони вимагають явного зворотного зв'язку від користувача і часто на значному рівні участі користувача. Наприклад, перш ніж рекомендувати будь-які статті в групах новин, системі необхідно отримати рейтинги раніше прочитаних статей. Оскільки недоцільно вимагати рейтинги всіх цих статей від користувача, деякі системи рекомендацій використовують ненав'язливі методи визначення рейтингів, коли певні проксі використовуються для оцінки реальних рейтингів. Наприклад, кількість часу, який користувач витрачає на читання статті в групі новин, може служити проксі-рейтингами цієї статті. Деякі ненав'язливі методи отримання зворотного зв'язку з користувачем представлені в [14], [15]. Проте, ненав'язливі рейтинги (наприклад, час, витрачений на читання статті) часто є неточними і не можуть повністю замінити явні оцінки, надані користувачем. Таким чином, проблема мінімізації втручання при збереженні певних рівнів точності рекомендацій повинна вирішуватися дослідниками рекомендаційних систем.

Один із способів вивчення проблеми втручання – визначити оптимальну кількість оцінок, які система повинна запитувати у нового користувача. Наприклад, перш ніж рекомендувати будь-які фільми, MovieLens.org спочатку просить користувача оцінити

зумовлену кількість фільмів (наприклад, 20). Цей запит несе певні витрати для кінцевого користувача, який може бути змодельований по-різному, причому найпростіша модель являє собою модель з фіксованою вартістю (тобто, вартість рейтингу кожного фільму дорівнює C , а вартість рейтингу n фільмів C_n). Тоді проблему нав'язливості можна сформулювати як проблему оптимізації, яка намагається знайти оптимальну кількість оцінок запитів n наступним чином: кожен додатковий рейтинг, наданий користувачем, підвищує точність рекомендацій і, отже, призводить до певних переваг для користувача. Однією з цікавих задач, пов'язаних з проблемою втручання, було б розробка формальної моделі для визначення та вимірювання переваг $B(n)$ для надання n початкових рейтингів з точки зору підвищення точності прогнозів на основі цих оцінок. Як тільки стає відомо, як вимірювати переваги $B(n)$ (наприклад, вимірюючи точність прогнозування рекомендаційної системи), потрібно визначити оптимальну кількість початкових оцінок n , яка максимізує вираз $B(n) - C(n)$. Ясно, що оптимальне значення n досягається, коли граничні вигоди дорівнюють граничним витратам, тобто коли $\Delta B(n) = C$. Оптимальне рішення повинно існувати в припущенні, що $B(n)$ є монотонно зростаючою функцією по n зі зменшуваними граничними перевагами $\Delta B(n)$, що асимптотично сходиться до нуля.

Ще одна цікава можливість дослідження полягає в розробці моделей граничних витрат, які є більш просунутими, ніж модель з фіксованою вартістю, описана вище, і яка потенційно може включати аналіз витрат і переваг використання як неявних, так і явних оцінок в системі рекомендацій. Нарешті, проблема поступового вибору навчальних даних для цілей моделювання – проблема активного навчання, яка є досить добре вивченою областю в літературі машинного навчання, і були запропоновані численні підходи до вирішення цієї проблеми [16], [17], [18]. Ми вважаємо, що застосування активних методів навчання для вирішення проблеми невтручання являє собою ще одну цікаву можливість для дослідження.

Гнучкість. Більшість рекомендаційних методів негнучкі в тому сенсі, що вони «жорстко підключені» до систем постачальниками і, отже, підтримують тільки зумовлений і фіксований набір рекомендацій. Тому кінцевий користувач не може налаштувати рекомендації відповідно до своїх потреб в режимі реального часу. Ця проблема була ідентифікована в [19], і для неї була запропонована рекомендаційна мова запитів (Recommendation Query Language) [20]. RQL – це SQL-подібна мова для вираження гнучких рекомендаційних запитів, призначених для користувача. Наприклад, запит «рекомендувати кожному користувачеві з Нью-Йорка кращі три фільми, тривалість яких перевищує дві години», може бути виражена в RQL наступним чином:

```
RECOMMEND Movie TO User
      BASED ON Rating
      SHOW TOP 3
```

```
FROM      MovieRecommender
WHERE     Movie.Length>120
AND      User.City = "NewYork"
```

Крім того, більшість рекомендаційних систем рекомендують тільки окремі елементи для окремих користувачів і не займаються агрегацією. Тим не менш, важливо мати можливість надавати агреговані рекомендації в ряді програм, таких як рекомендації брендів або категорій продуктів для певних сегментів користувачів. Наприклад, рекомендаційна система пов'язана з поїздками може порекомендувати відпочинок у Флориді (категорія продуктів) студентам з північного сходу (призначений для користувача сегмент) під час весняних канікул. Одним із способів підтримки агрегованих рекомендацій є використання підходу до багатовимірних рекомендацій, заснованого на OLAP [21]. Системи на основі OLAP, природно, підтримують ієрархії агрегацій, а початкові підходи до розгортання OLAP-методів в системах рекомендацій представлені в [22]. Проте, потрібно провести роботу для розробки більш повного розуміння того, як використовувати підхід OLAP в рекомендаційних системах, і це уявляє собою цікаву й складну дослідницьку проблему.

Ефективність рекомендацій. Проблема розробки хороших показників для оцінки ефективності рекомендацій була широко розглянута в літературі системних рекомендацій. Деякі приклади цієї роботи включають [23], [24]. У більшості літератури про рекомендаційні системи, оцінка ефективності рекомендаційних алгоритмів зазвичай виконується з точки зору метрик охоплення і точності. Охоплення вимірює відсоток елементів, для яких система рекомендацій може робити прогнози [25]. Міри точності можуть бути або статистичними, або застосовуватись для підтримки рішення. Статистичні показники точності в основному порівнюють оцінки рейтингу (наприклад, як визначено в (1)) з фактичними рейтингами R в матриці Користувач \times Елемент і включає середню абсолютну помилку (MAE), середньоквадратичну помилку і кореляцію між прогнозами і рейтингами. Міри підтримки прийняття рішень визначають, наскільки добре система рекомендацій може скласти прогнози високорелевантних елементів (наприклад, елементи, які будуть високо оцінені користувачами). Вони включають в себе класичні IR-міри точності (відсоток дійсно «високих» рейтингів серед тих, які були передбачені «високими» в рекомендаційній системі), нагадування/відгук (recall) (відсоток правильно передбачених «високих» значень, рейтинги серед усіх рейтингів, які, відомо є «високими»), показник F (середнє гармонійне значення точності і відгук) і міра робочої характеристики приймача (Receiver Operating Characteristic, ROC), що демонструє компроміс між істинними позитивними і хибно позитивними показниками в рекомендаційних системах [26].

Незважаючи на популярність, ці емпіричні оцінки мають певні обмеження. Одне з обмежень полягає в тому, що ці заходи зазвичай виконуються на тестових даних, які користувачі вирішили оцінити.

Однак елементи, які користувачі вважають за краще оцінювати, швидше за все, будуть являти собою нерівномірну вибірку, наприклад, користувачі можуть оцінювати в основному ті елементи, які їм подобаються. Іншими словами, результати емпіричної оцінки зазвичай показують тільки те, наскільки точна система на елементах, які користувач вирішив оцінити, тоді як здатність системи правильно оцінювати випадковий елемент (це те, що повинна робити система під час свого нормального життєвого циклу) не перевіряється. Зрозуміло, що це дорого і трудомістко проводити експерименти, які перевіряють якість рекомендацій на неупередженій випадковій вибірці, яка рідко зустрічається. Однак для того, щоб дійсно зрозуміти переваги і обмеження пропонованих рекомендацій, необхідні високоякісні експерименти.

Крім того, хоча важливо є вимірювання точності рекомендацій, технічні заходи, згадані раніше, часто не враховують «корисність» і «якість» рекомендацій. Наприклад, при спостереганні за заявкою в супермаркеті, рекомендуючи очевидні елементи (такі як молоко чи хліб), які споживач купить в будь-якому випадку, буде мати високі показники точності, однак це не буде дуже корисно для споживача. Тому важливо також розробити економічно-орієнтовані міри, такі як показники рентабельності інвестицій (ROI) і цінності життєвого циклу клієнта (LTV) [27]. Розробка і вивчення заходів, спрямованих на усунення обмежень, описаних в цьому розділі, складає цікаву і важливу дослідницьку тему.

Інші розширення. Інші важливі проблеми дослідження, які були вивчені в літературі рекомендаційних систем, включають пояснення [12], достовірність [28], масштабованість [4] та конфіденційність [11]. Однак ми не будемо розглядати ці роботи і не будемо обговорювати можливості дослідження в цих областях із-за обмеженості простору.

SWOT-аналіз отриманих результатів. Полягає в розподіленні чинників:

- сильних (Strengths)
- і слабких (Weaknesses) сторін проекту,
- можливостей (Opportunities), що відкриваються при його реалізації
- та загроз (Threats), пов'язаних з його здійсненням.

При подальшому розгляді підходів структурована інформація по кожному з напрямків – впливи, слабкі сторони, можливості, загрози – характеризується кількісними значеннями, на основі яких, при застосуванні функцій корисності прораховується потенціал досліджуваного об'єкта по відповідному з напрямків, як підхід, що будується в рамках Conjoint-аналізу.

З появою SWOT-моделі фахівці з обробки аналітичних даних, отримали високоякісний інструмент для інтелектуальної обробки інформації. Загальновідомо, але неструктуровану та несистематизовану інформацію про стан справ у компаніях та про конкурентне оточення, SWOT-аналіз дозволяє сформулювати аналітикам у вигляді логічно погодженої схеми

взаємодії впливів, слабкостей, можливостей і погроз. Сильні сторони компанії сприятимуть забезпеченню просування товарів на ринку та швидшому досягненню стратегічних цілей, у той час як його «слабкості» викликають негативне гальмування. Тут також природно враховувати можливості й загрози зовнішнього середовища, без яких неможливо вірно визначити сценарії розвитку організації. Що в свою чергу сприятиме цінності прогнозів та моніторингу даних, та підвищить конкурентоспроможність гравців ринку.

Висновки. В останні десятиліття рекомендаційні системи досягли значного прогресу, коли були запропоновані контентні, колаборативні та гібридні методи, і були розроблені кілька «промислових» систем. Однак, незважаючи на всі ці досягнення, нинішнє покоління рекомендаційних систем, розглянутих в цій статті, як і раніше вимагає подальших поліпшень, щоб зробити рекомендації більш ефективними в більш широкому спектрі застосувань. У цій статті розглянуто різні обмеження існуючих рекомендаційних методів та обговорено можливі розширення, які можуть забезпечити найкращі рекомендації. Ці розширення включають, серед іншого, покращене моделювання користувачів і елементів, включення контекстної інформації в процес рекомендацій, підтримку багатокритеріальних рейтингів і надання більш гнучкого і менш нав'язливого процесу рекомендацій. Ми сподіваємося, що проблеми, представлені в цьому документі, будуть сприяти обговоренню в співтоваристві рекомендаційних систем щодо наступного покоління рекомендаційних технологій.

Список літератури

1. Wang Z., Liu X., Li H., Shi J., Rao Y. A Saliency Detection Based Unsupervised Commodity Object Retrieval Scheme. *IEEE Access*. 2018, vol. 6. P. 49902–49912. doi:10.1109/ACCESS.2018.2868139
2. Neves Ana Régia de M., Carvalho Álvaro Marcos G., Ralha Célia G. Agent-based architecture for context-aware and personalized event recommendation. *Expert Systems with Applications*. 2014, vol. 41, issue 2. P. 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.081>
3. Wang Shu-Lin, Wu Chun-Yi. Application of context-aware and personalized recommendation to implement an adaptive ubiquitous learning system. *Expert Systems with Applications*. 2011, vol. 38, issue 9. P. 10831–10838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.083>
4. Muhammad Afzal, Syed Imran Ali, Rahman Ali, Maqbool Hussain, Taqdir Ali, Wajahat Ali Khan, Muhammad Bilal Amin, Byeong Ho Kang, Sungyoung Lee. Personalization of wellness recommendations using contextual interpretation. *Expert Systems with Applications*. 2018, vol. 96. P. 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.11.006>
5. Cutting D., Karger D., Pedersen J., Tukey J. A Cluster-based Approach to Browsing Large Document Collections. *Semantic scholar*. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1134/3448f8a817fa391e3a7897a95f975ad2873a.pdf> (дата звернення: 10.10.2018).
6. Yaohao Peng, Pedro Henrique Melo Albuquerque, Jader Martins Camboim de Sá, Ana Julia Akaishi Padula, Mariana Rosa Montenegro. The best of two worlds: Forecasting high frequency volatility for cryptocurrencies and traditional currencies with Support Vector Regression. *Expert Systems with Applications*. 2018, vol. 97. P. 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.004>
7. Sasvári Tamás. *Language Detector class (C#)*. URL: http://idsyst.hu/development/language_detector.html (дата звернення: 01.10.2018).

8. Бутова Р. К., Назарова Г. Н., Павленко Л. А. та ін. *Інформаційні системи і технології в економіці: посіб. для студ. вищих навч. закл.* Київ: Академія, 2002. 544 с
9. Апопій В. В., Олексин І. І., Шутовська Н. О., Футало Т. В. *Організація і технологія надання послуг: навч. посіб.* Київ: Академія, 2016. 312 с.
10. Федулова Л. І. *Інноваційна економіка: підручник.* Київ: Либідь, 2006. 480 с.
11. Гесць В. Характер перехідних процесів до економіки знань. *Економіка України.* 2004. № 5. С. 4–13.
12. Nilashi M., Esfahani M. D., Roudbaraki M. Z., Ramayah, T., Ibrahim O. A multi-criteria collaborative filtering recommender system using clustering and regression techniques. *Journal of Soft Computing and Decision Support Systems.* 2016, vol. 3, no. 5. P. 24–30.
13. *Економічна правда.* 2018, 8 грудня. URL: <https://www.epravda.com.ua/> (дата звернення: 10.10.2018).
14. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Recommender systems: introduction and challenges. *Recommender systems handbook.* Boston: Springer, 2015. P. 1–34.
15. Sivaraman S., Trivedi M. M. Active learning for on-road vehicle detection: A comparative study. *Machine vision and applications.* 2014. Vol. 25, no. 3. P. 599–611.
16. Rubens N., Elahi M., Sugiyama M., Kaplan D. Active learning in recommender systems. *Recommender systems handbook.* 2015, Boston: Springer, 2015. P. 809–846.
17. Buczak A. L., Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2016, vol. 18, no. 2. P. 1153–1176.
18. Ulissi Z. W., Medford A. J., Bligaard T., Nørskov J. K. To address surface reaction network complexity using scaling relations machine learning and DFT calculations. *Nature communications.* 2017, vol. 8. P. 14621–14627.
19. Hwangbo H., Kim Y. S., Cha K. J. Recommendation system development for fashion retail e-commerce. *Electronic Commerce Research and Applications.* 2018, vol. 28. P. 94–101.
20. Wongsuphasawat K., Moritz D., Anand A., Mackinlay J., Howe B., Heer J. Towards a general-purpose query language for visualization recommendation. *Proceedings of the Workshop on Human-In-the-Loop Data Analytics.* URL: <https://www.domoritz.de/papers/2016-Compasql-HILDA.pdf> (дата звернення: 01.10.2018).
21. Yashchuk D. Y., Golub, B. L. Research on the Use of OLAP Technologies in Management Tasks. *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing.* Cham: Springer, 2018. P. 683–691.
22. Gallinucci, E., Golfarelli, M., Rizzi, S. *Variety-Aware OLAP of Document-Oriented Databases.* 2018.
23. Kluver D., Ekstrand M. D., Konstan J. A. (). Rating-based collaborative filtering: algorithms and evaluation. *Social Information Access.* Springer, Cham, 2018. P. 344–390.
24. Wang D., Liang Y., Xu D., Feng X., Guan R. A content-based recommender system for computer science publications. *Knowledge-Based Systems.* 2018, vol. 157. P. 1–9.
25. Аулін В. В., Голуб Д. В. Методи оцінки і аналізу надійності автомобільних транспортних систем. *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій».* 2017. Т. 3. С. 14–15.
26. Leris D., Sein-Echaluce M. L., Hernández, M., Bueno C. Validation of indicators for implementing an adaptive platform for MOOCs. *Computers in Human Behavior.* 2017, vol. 72. P. 783–795.
27. Chaikovska M., Chaikovskiy M. Strategies for implementation of affiliate-projects in marketing activity. *Scientific Journal of Polonia University.* 2018, vol. 27, no. 2. P. 18–25.
28. Wang S., Zheng Z., Wu Z., Lyu M. R., Yang F. Reputation measurement and malicious feedback rating prevention in web service recommendation systems. *IEEE Transactions on Services Computing.* 2015, vol. 8, no. 5. P. 755–767.
29. Neves Ana Régia de M., Carvalho Álvaro Marcos G., Ralha Célia G. Agent-based architecture for context-aware and personalized event recommendation. *Expert Systems with Applications.* 2014, vol. 41, issue 2, pp. 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.081>
30. Wang Shu-Lin, Wu Chun-Yi. Application of context-aware and personalized recommendation to implement an adaptive ubiquitous learning system. *Expert Systems with Applications,* 2011, vol. 38, issue 9, pp. 10831–10838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.083>
31. Muhammad Afzal, Syed Imran Ali, Rahman Ali, Maqbool Hussain, Taqdir Ali, Wajahat Ali Khan, Muhammad Bilal Amin, Byeong Ho Kang, Sungyoung Lee. Personalization of wellness recommendations using contextual interpretation. *Expert Systems with Applications.* 2018, vol. 96, pp. 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.11.006>
32. Cutting D., Karger D., Pedersen J., Tukey J. *A Cluster-based Approach to Browsing Large Document Collections. Semantic scholar.* Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/1134/3448f8a817fa391e3a7897a95f975ad2873a.pdf> (accessed 10.10.2018).
33. Yaohao Peng, Pedro Henrique Melo Albuquerque, Jader Martins Camboim de Sá, Ana Julia Akaishi Padula, Mariana Rosa Montenegro. The best of two worlds: Forecasting high frequency volatility for cryptocurrencies and traditional currencies with Support Vector Regression. *Expert Systems with Applications.* 2018, vol. 97, pp. 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.004>
34. Sasvári Tamás. *Language Detector class (C#).* Available at: http://idsyst.hu/development/language_detector.html (accessed 01.10.2018).
35. Butova R. K., Nazarov G. N., Pavlenko L. A. and others. *Інформаційні системи і технології в економіці: посіб. для студ. вищих навч. закл.* [Information systems and technologies in the economy: manual. for studio higher educators shut up]. Kiev, Academy Publ., 2002. 544 p.
36. Apopia V. V., Olexin I. I., Shutovskaya N. O., Futalo T. V. *Організація і технологія надання послуг: навчальний посібник* [Organization and technology of providing services: Teaching manual]. Kiev, Academy Publ., 2016. 312 pp.
37. Fedulova L. I. *Інноваційна економіка: підручник* [Innovative economy: textbook]. Kiev, Lybid Publ., 2006. 480 p.
38. Geets V. Charakter perehidnyh procesiv do ekonomiky znan' [Character of Transitional Processes to the Knowledge Economy]. *Економіка України* [Economics of Ukraine]. 2004, no. 5, pp. 4–13.
39. Nilashi M., Esfahani M. D., Roudbaraki M. Z., Ramayah, T., Ibrahim O. A multi-criteria collaborative filtering recommender system using clustering and regression techniques. *Journal of Soft Computing and Decision Support Systems.* 2016, vol. 3, no. 5, pp. 24–30.
40. *Економічна правда* [Economic truth]. 2018, December 18. [Electronic resource]. Available at: <https://www.epravda.com.ua/> (accessed 01.10.2018)
41. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Recommender systems: introduction and challenges. *Recommender systems handbook.* Boston, Springer, 2015, pp. 1–34.
42. Sivaraman S., Trivedi M. M. Active learning for on-road vehicle detection: A comparative study. *Machine vision and applications.* 2014, vol. 25, no. 3, pp. 599–611.
43. Rubens N., Elahi M., Sugiyama M., Kaplan D. Active learning in recommender systems. *Recommender systems handbook.* Boston, Springer, 2015, pp. 809–846.
44. Buczak A. L., Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2016, vol. 18, no. 2, pp. 1153–1176.
45. Ulissi Z. W., Medford A. J., Bligaard T., Nørskov J. K. To address surface reaction network complexity using scaling relations machine learning and DFT calculations. *Nature communications.* 2017, vol. 8, pp. 14621–14627.
46. Hwangbo H., Kim Y. S., Cha K. J. Recommendation system development for fashion retail e-commerce. *Electronic Commerce Research and Applications.* 2018, vol. 28, pp. 94–101.
47. Wongsuphasawat K., Moritz D., Anand A., Mackinlay J., Howe B., Heer J. Towards a general-purpose query language for visualization recommendation. *Proceedings of the Workshop on Human-In-the-*

References (transliterated)

1. Wang Z., Liu X., Li H., Shi J., Rao Y. A Salient Detection Based Unsupervised Commodity Object Retrieval Scheme. *IEEE Access.* 2018, vol. 6, pp. 49902–49912. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868139.

- Loop Data Analytics. Available at: <https://www.domoritz.de/papers/2016-Compassql-HILDA.pdf> (accessed 01.10.2018).
21. Yashchuk D. Y., Golub, B. L. Research on the Use of OLAP Technologies in Management Tasks. *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing*. Cham, Springer, 2018, pp. 683–691.
 22. Gallinucci, E., Golfarelli, M., Rizzi, S. *Variety-Aware OLAP of Document-Oriented Databases*. 2018.
 23. Kluver D., Ekstrand M. D., Konstan J. A. (). Rating-based collaborative filtering: algorithms and evaluation. *Social Information Access*. Springer, Cham, 2018, pp. 344–390.
 24. Wang D., Liang Y., Xu D., Feng X., Guan R. A content-based recommender system for computer science publications. *Knowledge-Based Systems*. 2018, vol. 157, pp. 1–9.
 25. Aulin V. V., Holub D. V. Metody otsinky i analizu nadiynosti avtomobil'nykh transportnykh system [Methods of estimation and analysis of reliability of automobile transport systems]. *Zbirnyk tez dopovidej VI Mizhnarodnoi' naukovykh-tekhnichnoi' konferencii' molodyh uchenykh ta studentiv „Aktual'ni zadachi suchasnykh tehnologij“* [Proc. of VI International Science and Technology and Conference of Young Researchers and Students „Current problems of modern technologies“]. 2017, vol. 3, pp. 14–15.
 26. Leris D., Sein-Echaluce M. L., Hernández, M., Bueno C. Validation of indicators for implementing an adaptive platform for MOOCs. *Computers in Human Behavior*. 2017, vol. 72, pp. 783–795.
 27. Chaikovska M., Chaikovskiy M. Strategies for implementation of affiliate-projects in marketing activity. *Scientific Journal of Polonia University*. 2018, vol. 27, no. 2, pp. 18–25.
 28. Wang S., Zheng Z., Wu Z., Lyu M. R., Yang F. Reputation measurement and malicious feedback rating prevention in web service recommendation systems. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2015, vol. 8, no. 5, pp. 755–767.

Надійшла (received) 19.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чередніченко Ольга Юрійвна (Чередниченко Ольга Юрьевна, Cherednichenko Olga Yuryevna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9391-5220>; e-mail: olha.cherednichenko@gmail.com

Іващенко Оксана Віталіївна (Иващенко Оксана Витальевна, Ivashchenko Oksana Vitaliivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-3914>; e-mail: Oksana_ivashchenko@ukr.net

Гонтар Юлія Миколаївна (Гонтарь Юлия Николаевна, Gontar Yulia Mykolaivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: gontaryn@gmail.com

Ворона Борис Михайлович (Ворона Борис Михайлович, Vorona Borys Mykhailovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9649-0264>; e-mail: borysvorona@gmail.com

УДК 004.891.3

DOI: 10.20998/2079-0023.2018.44.11

В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА**ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВНОГО НАВЧАННЯ В СИТУАЦІЇ ЦИКЛІЧНОГО ХОЛОДНОГО СТАРТУ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

Досліджено проблему побудови рекомендацій для систем електронної комерції в умовах циклічного холодного старту. Дана проблема виникає при постійній зміні інтересів користувачів протягом строку використання рекомендаційної підсистеми. Існуючі підходи до формування рекомендацій в умовах холодного старту засновані на поступовому накопиченні інформації про споживача і тому не забезпечують релевантних рекомендацій у випадку циклічних змін у їх діяльності та інтересах. Для вирішення цієї проблеми пропонується враховувати аспект зміни інтересів користувачів щодо товарів та послуг в часі. Мета даної роботи полягає в уточненні принципів активного навчання для побудови рекомендацій в умовах зміни інтересів споживачів з тим, щоб забезпечити поетапне уточнення персональних рекомендацій «холодним» споживачам. Отримані результати містять у собі деталізовану задачу формування рекомендацій, та уточнені принципи активного навчання. Виділено ключову особливість циклічного холодного старту в рекомендаційній системі, що полягає в обмеженості періоду, протягом якого може бути доповнена та уточнена інформація про клієнта системи електронної комерції. Зазначена особливість обумовлює потребу в врахуванні аспекту часу при формуванні рекомендацій щодо вибору товарів та послуг. Сформульовано задачу формування рекомендацій в умовах циклічного холодного старту як задачу ітеративного доповнення та уточнення даних нового «холодного» користувача патернами найбільш розповсюджених циклів поведінки споживачів з подальшим використанням колаборативної фільтрації уточнених даних для формування рекомендацій. Доповнено принципи застосування активного навчання для умов циклічного холодного старту на основі використання типових послідовностей дій користувача у часі. Вказані принципи дозволяють коригувати вхідні дані для «холодного» користувача за допомогою евристичної стратегії, що враховує зміни у патернах поведінки споживачів. Патерни поведінки відображають циклічні зміни інтересу споживачів щодо товарів та послуг, що пропонує система електронної комерції.

Ключові слова: рекомендаційні системи, ранжування результатів; холодний старт, колаборативна фільтрація, формування рекомендацій.

В. А. ЛЕЩИНСКИЙ, И. А. ЛЕЩИНСКАЯ**ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ В СИТУАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ХОЛОДНОГО СТАРТА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Исследована проблема построения рекомендаций для систем электронной коммерции в условиях циклического холодного старта. Данная

© В. О. Лещинський, І. О. Лещинська, 2018

проблема возникает при постоянной смене интересов пользователей в течение срока использования рекомендательной подсистемы. Существующие подходы к формированию рекомендаций в условиях холодного старта основаны на постепенном накоплении информации о потребителе и поэтому не обеспечивают релевантных рекомендаций в случае циклических изменений в их деятельности и их интересах. Для решения этой проблемы предлагается учитывать аспект изменения интересов пользователей во времени в отношении товаров и услуг. Цель данной работы заключается в уточнении принципов активного обучения для построения рекомендаций в условиях изменения интересов потребителей с тем, чтобы обеспечить поэтапное уточнение персональных рекомендаций «холодным» потребителям. Полученные результаты включают в себя детализованную задачу формирования рекомендаций, и уточненные принципы активного обучения. Выделена ключевая особенность циклического холодного старта в рекомендательной системе. Она состоит в ограниченности периода, в течение которого может быть дополнена и уточнена информация о клиенте системы электронной коммерции. Указанная особенность обуславливает потребность в учете аспекта времени при формировании рекомендаций по выбору товаров и услуг. Сформулирована задача формирования рекомендаций в условиях циклического холодного старта как задача итеративного дополнения и уточнения данных нового «холодного» пользователя паттернами наиболее распространенных циклов поведения потребителей с последующим использованием коллаборативной фильтрации уточненных данных для формирования рекомендаций. Дополнены принципы применения активного обучения для условий циклического холодного старта на основе использования типовых последовательностей действий пользователя во времени. Указанные принципы позволяют корректировать входные данные для «холодного» пользователя путем использования эвристической стратегии, учитывающей изменения в паттернах поведения потребителей. Паттерны поведения отражают циклические изменения интереса потребителей в отношении товаров и услуг, предлагаемых системой электронной коммерции.

Ключевые слова: рекомендательные системы, ранжирование результатов; холодный старт, коллаборативная фильтрация, формирование рекомендаций.

V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA

THE USE OF ACTIVE LEARNING IN A SITUATION OF A CYCLICAL COLD START OF THE RECOMMENDER SYSTEM

The problem of constructing recommendations for electronic commerce systems under conditions of cyclic cold start is investigated. This problem occurs with the constant change of user interests over the period of use of the reference subsystem. Existing approaches to forming recommendations in a cold start are based on the gradual accumulation of consumer information and therefore do not provide relevant recommendations in the event of cyclical changes in their activities and interests. To address this problem, it is proposed to take into account the aspect of changing user interests in relation to goods and services in time. The purpose of this work is to clarify the principles of active training to build recommendations in the changing consumer interests in order to provide a step-by-step refinement of personal recommendations to "cold" consumers. The obtained results contain a detailed task of forming recommendations, and the principles of active training are specified. The key feature of the cyclic cold start in the reference system is distinguished, which is the limited period during which the information about the customer of the electronic commerce system can be supplemented and refined. This feature makes it necessary to take into account the aspect of time when forming recommendations on the choice of goods and services. The problem of forming recommendations in the conditions of cyclic cold start is formulated as a task of iterative addition and refinement of the data of the new "cold" user by the patterns of the most common cycles of consumer behavior followed by the use of collaborative filtering of the refined data for the formulation of recommendations. The principles of active training for cyclic cold start conditions based on the use of typical sequence sequences of the user in time are supplemented. These principles allow you to adjust the input data for a "cold" user using a heuristic strategy that takes into account changes in patterns of consumer behavior. The patterns of behavior reflect cyclical changes in consumers' interest in the products and services offered by the e-commerce system.

Keywords: recommender systems, ranking of results; cold start, collaborative filtration, formation of recommendations.

Вступ. Рекомендаційні підсистеми призначені для підтримки вибору клієнтів систем електронної комерції шляхом формування рекомендацій у вигляді рейтингового переліку товарів та послуг, що можуть зацікавити цього споживача [1-3].

Вони забезпечують раціональний вибір для користувачів сайтів електронної комерції, які не мають часу для порівняльного аналізу цікавих для них груп товарів та послуг [4, 5]. Наприклад, потоковий сервіс Netflix Movie та магазин Amazon.com забезпечують персоналізацію переліку фільмів та товарів відповідно на основі створення для кожного користувача рекомендованого упорядкованого за рейтингом списку об'єктів інтересу [6].

Побудова рекомендацій в таких системах базується на двох принципово відмінних підходах. Перший підхід передбачає використання даних про вподобання інших споживачів. Такі дані формуються із історії їх вибору та покупок або рейтингу, що виставляє споживач цим товарам.

Даний підхід заснований на використанні ідеї про те, що користувачі зі схожими історіями покупок мають близькі вподобання. Тому при виборі типових товарів та послуг доцільно застосовувати рекомендації, що засновані на виборі інших користувачів в цій же сфері [1]. В рамках даного підходу інформація про властивості товарів та послуг не використовується.

Однак підхід потребує, щоб наповненість матриці вхідних даних перевищувала визначений поріг.

Альтернативний підхід на основі використання бази знань враховує інформацію про властивості об'єктів інтересу споживачів. Наприклад, при побудові рекомендацій для вибору мобільного телефону враховується інформація про ємність батареї, розмір екрану, частоту процесора, тощо. Даний підхід не враховує інформацію про історії покупок інших користувачів, однак потребує постійної корекції бази фактів та бази знань, що поєднує ці факти із інтересами споживача.

Одна із важливих проблем, яка виникає при побудові рекомендаційних систем, це проблема холодного старту, пов'язана з використання системи для нових споживачів або для нових товарів. Відсутність інформації про вибір для нових споживачів не дозволяє порівняти його з історією вибору існуючих користувачів сайту електронної комерції. Це створює труднощі при застосуванні першого підходу до побудови рекомендаційних систем.

Застосування заснованого на використанні баз знань підходу пов'язано із труднощами у випадку неповноти інформації про властивості нових товарів та послуг. Доповнення цієї бази потребує значних витрат часу спеціалістів у відповідній сфері діяльності.

Особливо актуальною є проблема циклічного холодного старту, яка пов'язана не лише із появою нових споживачів, нових товарів та послуг, а й періодичною зміною інтересів поточних клієнтів системи електронної комерції. Такі циклічні зміни можуть бути сезонними (вибір одягу, путівок), пов'язаними зі зміною місця роботи, проживання, навчання, професії, тощо, та із використанням різних пристроїв (комп'ютер, телефон) для доступу до відповідних сайтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Побудова рекомендацій на основі аналізу історій вподобань існуючих користувачів системи електронної комерції виконується переважно з використанням колаборативної фільтрації [6, 7]. Методи колаборативної фільтрації передбачають виявлення латентних факторів, що впливають на вибір користувачів [1, 3]. Наприклад, для системи продажів потокового відео вказані фактори відображають зв'язок жанрових особливостей фільму із інтересами клієнтів стрімінгового сервісу.

Знання-орієнтовані методи побудови рекомендацій використовують контекстну інформацію, що дозволяє формувати рекомендації у випадку не релевантних даних про історію пошуку споживачів [8, 9]. Контекст визначає умови та обмеження на вибір споживача [10, 11, 12].

При вирішенні проблеми холодного старту використовується поєднання колаборативної фільтрації із контекстними даними [13] або пошук додаткової інформації про споживача, наприклад в соціальних мережах [14]. Такі гібридні підходи поступово доповнюють інформацію про споживачів та про товари. Однак вони не враховують темпоральний аспект змін вподобань споживача. В той же час цей аспект може відображати набір залежностей, які відповідають неясним знанням споживачів [15] та обумовлюють їх поведінку при реалізації процесу вибору товарів та послуг в системах електронної комерції. Це і визначає актуальність теми даної статті.

Метою даної статті є уточнення принципів активного навчання щодо побудови рекомендацій в умовах циклічного холодного старту з тим, щоб забезпечити можливість поетапного уточнення персональних рекомендацій новими споживачам і, як наслідок, підвищити ефективність роботи рекомендаційних систем.

Для досягнення поставленої мети в статті вирішуються такі задачі:

- визначення задачі формування рекомендацій з урахуванням темпорального аспекту, що відображає циклічність поведінки споживача;

- уточнення принципів активного навчання з урахуванням формування рекомендацій в умовах циклічного холодного старту рекомендаційної системи.

Задача формування рекомендацій в умовах циклічного холодного старту. Характерна відмінність циклічного холодного старту полягає в обмеженості періоду, протягом якого доповнюється інформація про клієнта системи електронної комерції. Після завершення такого періоду інтереси користувача змі-

нюються і збір інформації про його властивості потрібно починати спочатку. Базові причини зміни властивостей споживача було наведено у вступі. Відмінності традиційного та циклічного холодного старту представлено у табл. 1.

Таблиця 1 – Відмінності традиційного та циклічного холодного старту в рекомендаційній системі

Характеристики	Одноразовий холодний старт	Циклічний холодний старт
Неповнота інформації про споживача/товар	+	+
Циклічна зміна вподобань користувача з часом	–	+
Можливість поступового уточнення інформації про споживача	Протягом роботи рекомендаційної системи	Протягом обмеженого інтервалу часу
Зміна інтересів споживача обумовлена відомими циклічними зовнішніми факторами	+	+
Зміна вибору споживача в умовах неповної інформації про вплив зовнішніх факторів	–	+

Із наведених у табл. 1 даних можна зробити висновки про важливість врахування аспекту часу при прогнозуванні вибору нового користувача системи електронної комерції у випадку циклічного холодного старту. Тобто традиційно при відсутності інформації про нового користувача рекомендаційна система накопичує його дані і на цій основі визначає властивості, які можуть впливати на його вибір.

Однак у випадку циклічного холодного старту при зміні інтересів споживача вся накопичена про нього інформація стає неактуальною і виникає потреба у новому циклі набору й аналізу даних про властивості клієнта сайту електронної комерції.

Для аналізу даних про клієнтів та видачі рекомендацій необхідно знайти константну складову у такій нестабільній ситуації. Аналіз табл. 1 показує, що вказаним константним елементом є цикл накопичення інформації про характеристики користувача. Для традиційного одноразового холодного старту цей цикл є безперервним і виконується протягом роботи рекомендаційної системи. Для циклічного холодного старту послідовність дій з набору інформації повторюється кожен раз при зміні вподобань користувача.

Відповідно, формалізація послідовності зміни вподобань об'єднує цикли набору інформації про споживача. Створення бібліотеки патернів найбільш типових послідовностей вибору товарів та послуг в часі дозволяє охарактеризувати послідовність зміни інтересів споживача і, таким чином, створити умови для побудови релевантних рекомендацій у випадку циклічного холодного старту.

Традиційно при побудові рекомендацій використовуються залежності $r_{ij} \in R$, що визначають важливі

для користувачів $u_i \in U$ предмети $e_j \in E$, відповідно $R: U \rightarrow E$.

У випадку циклічного холодного старту доцільно використовувати послідовності вибору важливих для користувача предметів (товарів, послуг) виду:

$$E_{CS} = \langle e_j, \dots, e_k, \dots, e_l | t_j < t_k < t_l \rangle, \quad (1)$$

де e_j, e_k, e_l – предмети, що вибрані користувачем;

t_j, t_k, t_l – моменти часу вибору предметів e_j, e_k, e_l відповідно.

Послідовності (1) доцільно розглядати як темпоральні знання, що відображають неявні причинно-наслідкові залежності, які обумовлюють вибір клієнтів сайту електронної комерції.

Використання наведених послідовностей дає можливість поєднати підходи до побудови рекомендацій на основі баз знань та колаборативну фільтрацію. Для цього необхідно на основі аналізу матриці R виявити патерни та сформувані найбільш типові послідовності E_{CS} . В подальшому такі послідовності можна використати для доповнення інформації про нового користувача.

Задача формування рекомендацій з урахуванням наведеного темпорального аспекту розбивається на дві підзадачі:

– доповнити інформацію про нового користувача з урахуванням типових залежностей (або залежності) E_{CS} ;

– виконати колаборативну фільтрацію з використанням вхідної матриці R , що містить доповнену інформацію про нового користувача.

Перша підзадача задається наступним чином:

$$\begin{aligned} & \text{Дано} \\ & \exists u_i \in U : \forall j r_{ij} = 0 \\ & \text{Знайти} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\{r_{ij}\} : \forall j r_{ij} = \begin{cases} c & \exists u_j \in E_{CS} \\ 0 & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де c – константа, що задає типовий кількісний вибір користувача; за замовчуванням $c=1$.

У відповідності до виразу (2) для нового користувача u_i , який ще не вибрав жодного товару e_j , тобто $r_{ij}=0$ для всіх j , необхідно задати дані про можливі зроблені покупки на основі залежностей, представлених E_{CS} . Тобто щоб сформувані релевантні для даного часу i в даній предметній області рекомендації, робиться припущення, що новий користувач буде використовувати найбільш типовий цикл зміни інтересів, відображений у вигляді послідовності вибору товарів E_{CS} .

Константа c визначає кількість потенційно вибраних новим споживачем предметів. Слід зазначити, що в даному випадку розглядається ситуація відсутності інформації про вибір споживача. Константа c

відображає потенційний типовий вибір, тому у загальному випадку можна задати $0 < c \leq 1$. Вплив значення c на релевантність рекомендацій потребує проведення додаткових досліджень.

Друга підзадача є типовою в рекомендаційній системі і полягає в формуванні рейтингу елементів e_j як найбільш цікавих для споживача на основі виявлення латентних факторів, що впливають на його вибір. При вирішенні другої підзадачі матриця R традиційно розглядається як незмінна.

Таким чином, послідовне вирішення двох підзадач дає можливість врахувати аспект зміни вподобань користувача у часі при підготовці рекомендацій для нового «холодного» користувача сайту електронної комерції.

Принципи застосування активного навчання в умовах циклічного холодного старту. Активне навчання [16] стосовно рекомендаційних систем полягає у інтерактивному виборі набору даних для більш точного формування рейтингу цікавих для користувача об'єктів.

Мета даного підходу полягає у виборі таких даних, що забезпечили б персоналізацію рекомендацій в умовах неповноти даних стосовно критеріїв, які споживач використовує при виборі товарів та послуг. Використання активного навчання дає можливість зменшити об'єм даних для формування рекомендацій, відкинути не релевантні дані, які не мають впливу на вибір споживача.

Уточнимо та доповнимо базові принципи активного навчання для рекомендаційної системи з урахуванням особливості циклічного холодного старту та можливості виділення знань, що відображають темпоральний аспект дій користувача сайту електронної комерції.

1) Персоналізація вхідних на основі патерну поведінки користувача.

Даний принцип активного навчання полягає у відборі лише тих елементів u_i , які відповідають патерну U_{CS} поведінки користувача в часі.

2) Використання об'єктного та часового аспекту вибору користувача для персоналізації даних.

Об'єктний аспект відображає ті товари та послуги, які були вибрані споживачем. Часовий аспект відображає послідовність його вибору.

3) Використання евристичних правил, які обумовлюють послідовне уточнення даних для формування рекомендацій «холодному» споживачеві.

У відповідності до наведених принципів, патерн поведінки споживача може бути відображений у вигляді зваженого набору послідовностей вибору E_{CS} :

$$U_{CS} = \{(E_{CS}, w)\}, \quad (3)$$

де w – вага E_{CS} , що відповідає частоті використання цієї послідовності в матриці R .

На рис. 1 представлено зв'язок між вибором споживача r_{ij} , послідовностями вибору E_{CS} , а також патерном поведінки споживача U_{CS} . Даний зв'язок

відображає наведений принцип врахування часового та об'єктного аспектів.

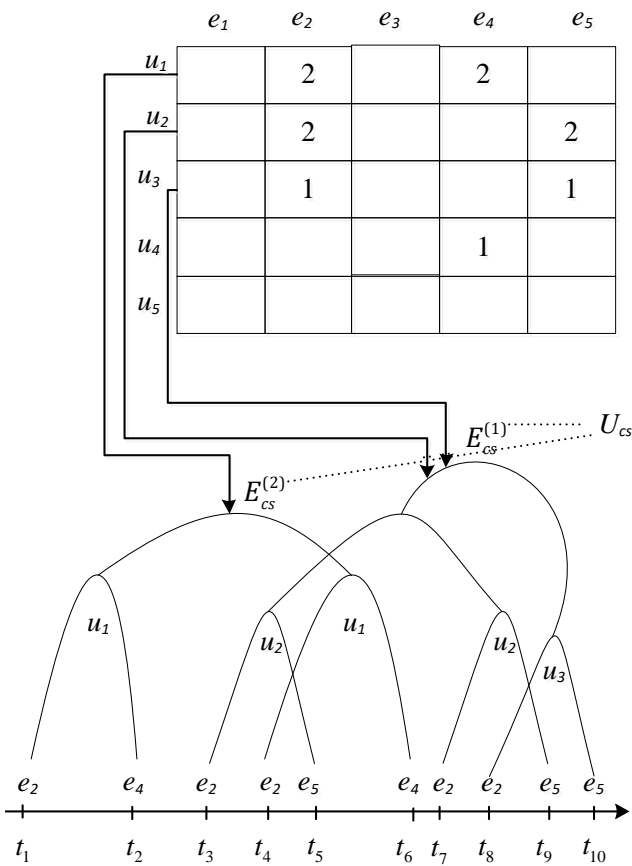


Рис. 1. Врахування часових характеристик вибору предметів при персоналізації даних для користувача

Споживач u_1 двічі послідовно вибрав об'єкти e_2 та e_4 , в моменти часу t_1 та t_2 , t_4 та t_6 що відображено в послідовності $E_{CS}^{(2)}$. Споживачі u_2 та u_3 тричі послідовно вибирали об'єкти e_2 та e_5 , що представлено послідовністю $E_{CS}^{(1)}$. Споживач u_4 вибрав лише один предмет, що не дозволяє виявити послідовність зміни його інтересів в часі. Споживач u_5 є «холодним», тобто він зареєструвався в системі, але не зробив жодного вибору.

Сукупність послідовностей вибору $E_{CS}^{(1)}$ та $E_{CS}^{(2)}$ задає патерн поведінки споживачів. В даному прикладі в якості ваг можемо використати кількість повторів вибору відповідних пар предметів. Тоді патерн поведінки споживача приймає вид:

$$U_{CS} = \{(E_{CS}^{(1)}, 2), (E_{CS}^{(2)}, 3)\}. \tag{4}$$

У відповідності до першого принципу при формуванні рекомендацій в умовах циклічного холодного старту для споживача u_5 можуть бути відібрані лише наявні дані по споживачам u_1 , u_2 та u_3 . Для споживача u_4 вхідні дані не містять інформації про циклічну поведінку. Тому ці дані не будуть використані.

Також при формуванні патерну потенційної поведінки для нового споживача u_5 можна задати порогове значення для послідовностей E_{CS} щоб використати лише найбільш уживані схеми поведінки користувачів. Наприклад, при пороговому значенні 3 патерн поведінки нового споживача матиме вигляд: $U_{CS} = \{(E_{CS}^{(2)}, 3)\}$.

У відповідності до другого принципу, наведений патерн поведінки користувача може бути використаний для заповнення його даних «замовчуванням», як було показано в (2).

Згідно третього принципу сформулюємо такі евристичні правила персоналізації даних для користувача в умовах циклічного холодного старту з урахуванням часового аспекту:

1) Для «холодного» користувача сайту електронної комерції, який ще не зробив вибору, формується початковий набір даних за замовчуванням згідно патерну типової поведінки, представленого виразом (3).

2) Після кожного вибору споживача набір даних за замовчуванням коригується на основі видалення елементів патерну U_{CS} , які не корегують з його поточним вибором.

Висновки. Виділено ключову особливість циклічного холодного старту в рекомендаційній системі: обмеженість у часі періоду, протягом якого може бути доповнена інформація про клієнта системи електронної комерції. Зазначена особливість обумовлює необхідність врахування аспекту часу при формуванні рекомендацій.

Сформульовано задачу формування рекомендацій в умовах циклічного холодного старту як задачу ітеративного доповнення даних «холодного» користувача патернами типових циклів поведінки споживачів з подальшою колаборативною фільтрацією уточнених даних.

Доповнено принципи застосування активного навчання для умов циклічного холодного старту. Вказані принципи дозволяють коригувати вхідні дані для «холодного» користувача на основі використання евристичної стратегії, що враховує зміни у патернах поведінки споживачів. Патерни поведінки відображають циклічні зміни інтересу споживачів щодо товарів та послуг, що пропонує система електронної комерції.

Запропоновано евристичні правила персоналізації даних для користувача в умовах циклічного холодного старту з урахуванням часового аспекту

Список літератури

1. Aggarwal C. C. *Recommender Systems: The Textbook*. New York: Springer, 2017. 498 p.
2. Abowd G., Atkeson C., Hong J., Long S., Kooper R., Pinkerton M. *Cyberguide: A mobile context-aware tour guide*. *Wireless Networks*. 1997. 3(5). P. 421–433.
3. Herlocker J. L., Konstan J. A., Terveen L. G., Riedl J. T. Evaluating collaborative filtering recommender systems. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*. 2004. Vol. 22, №1. P. 5–53.
4. Abowd G., Dey A., Brown P., Davies N., Smith M., Steggle P. Towards a better understanding of context and context-awareness. *Handheld and Ubiquitous Computing*. 1999. P. 304–307.

5. Adomavicius G., Sankaranarayanan R., Sen S., Tuzhilin A. Incorporating contextual information in recommender systems using a multidimensional approach. *ACM Transactions on Information Systems*. 2005. 23(1). P. 103–145.
6. Linden G., Smith B., York J. Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering. *Internet Computing, IEEE*. 2003. Vol. 7, № 1. P. 76–80.
7. Лещинский В. А., Лещинская И. А. Усовершенствование метода коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью на основе ранжирования отрицательных результатов в матрице исходных данных. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3(49). С. 73-77.
8. B. Smyth. Case-based recommendation. *The Adaptive Web*. Springer, 2007. P. 342–376.
9. D. Bridge, M. Goker, L. McGinty, and B. Smyth. Case-based recommender systems. *The Knowledge Engineering Review*. 2005. № 20(3). P. 315–320.
10. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Моделювання контексту в рекомендаційних системах. *Науковий журнал «Проблеми інформаційних технологій»*. Херсон: Херсонський національний технічний університет. 2018. № 1(023). С. 21-26.
11. Лещинський В. О., Лещинська І. О. Використання принципів локальності та зв'язності контексту в рекомендаційних системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». № 22 (1298) 2018. С. 16-21.
12. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Інтеграція локальних контекстів споживачів в рекомендаційних системах на основі відношень еквівалентності, схожості та сумісності. *Матеріали VII міжн. наук. конф. «Інформаційні управлітні системи та технології»*. Одеса, 2018. С.142-144.
13. Schein A. I., Popescul A., Ungar L. H., Pennock D. M. Methods and metrics for cold-start recommendations. *Proceedings of the 25th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. 2002. P. 253-260.
14. Guy I., Zwerdling N., Carmel D., Ronen I., Uziel E., Yogev S., Ofek-Koifman S. Personalized recommendation of social software items based on social relations. *Proceedings of the Third ACM Conference on Recommender Systems*. 2009. P. 53-60.
15. Kalynychenko O, Chaly S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. Implementation of Search Mechanism for Implicit Dependences in Process Mining. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference*. Vol. 1. P. 138-142.
16. Settles B. *Active Learning, Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*. Morgan & Claypool Publishers, 2012. 114 p.
5. Adomavicius G., Sankaranarayanan R., Sen S., Tuzhilin A. Incorporating contextual information in recommender systems using a multidimensional approach. *ACM Transactions on Information Systems*, 2005, no. 23(1), pp. 103–145.
6. Linden G., Smith B., York J. Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering. *Internet Computing, IEEE*, 2003, Vol. 7, no.1, pp. 76–80.
7. Leshchynskiy V., Leshchynska I. Usovershenstvovanie metoda kolaborativnoj filtracii s neyavnoj obratnoj svyazyu na osnove ranzhirovaniya otritsatelnyh rezultatov v matricie ishodnyh danyah [Collaborative Filtering for Implicit Feedback Datasets using Ranking Negative Data]. *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zvyazku* [Systems of control, navigation and communication]. Poltava, 2018, no. 3(49), pp. 73-77.
8. B. Smyth. Case-based recommendation. *The Adaptive Web*. Springer, 2007, pp. 342–376.
9. D. Bridge, M. Goker, L. McGinty, and B. Smyth. Case-based recommender systems. *The Knowledge Engineering Review*, 2005, № 20(3), pp. 315–320.
10. Chaliy S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Modelyuvannya kontekstu v rekomendacijnih sistemah [Modeling the context in recommender systems]. *Naukovij zhurnal «Problemi informacijnih tehnologij»* [Scientific journal "Problems of Information Technologies"]. Kherson: Kherson National Technical University, 2018, no. 1(023), pp. 21-26.
11. Leshchynskiy V., Leshchynska I. Viktoristannya principiv lokalnosti ta zvyaznosti kontekstu v rekomendacijnih sistemah [Using principles of locality and connectivity of the context in recommender systems]. *Visnyk Harkivskogo politehnicnogo instytutu: sb. nauch. tr.: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute: Sat. sci. tr.]: System Analysis, Management and Information Technology. Kharkov, NTU "KhPI" Publ. 2018, no 22 (1298), pp. 16-21.
12. Chaliy S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Integraciya lokalnih kontekstiv spozhivachiv v rekomendacijnih sistemah na osnovi vidnoshen ekvivalentnosti, shozhosti ta sumisnosti [Integration of local contexts of consumers in advisory systems based on equivalence, similarity and compatibility]. *Materiali VII mizhn. nauk. konf. «Informacijni upravlyayuchi sistemi ta tehnologiyi»* [Materials of the VII International Scientific Conference «Information-Control System and Technologies»]. Odessa, 2018, pp.142-144.
13. Schein A. I., Popescul A., Ungar L. H., Pennock D. M. Methods and metrics for cold-start recommendations. *Proceedings of the 25th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, 2002, pp. 253-260.
14. Guy I., Zwerdling N., Carmel D., Ronen I., Uziel E., Yogev S., Ofek-Koifman S. Personalized recommendation of social software items based on social relations. *Proceedings of the Third ACM Conference on Recommender Systems*, 2009, pp. 53-60.
15. Kalynychenko O, Chaly S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. Implementation of Search Mechanism for Implicit Dependences in Process Mining. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2013 IEEE 7th International Conference*, Vol. 1, pp. 138-142.
16. Settles B. *Active Learning, Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*. Morgan & Claypool Publishers, 2012. 114 p.

References (transliterated)

1. Aggarwal C. C. *Recommender Systems: The Textbook*. Springer, New York, 2017. 498 p.
2. Abowd G., Atkeson C., Hong J., Long S., Kooper R., Pinkerton M. Cyberguide: A mobile context-aware tour guide. *Wireless Networks*, 1997, no. 3(5), pp. 421–433.
3. Herlocker J.L., Konstan J.A., Terveen L.G., Riedl J.T. Evaluating collaborative filtering recommender systems. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 2004, Vol. 22, no. 1, pp. 5–53.
4. Abowd G., Dey A., Brown P., Davies N., Smith M., Steggle P. Towards a better understanding of context and context-awareness. *Handheld and Ubiquitous Computing*, 1999, pp. 304–307.

Надійшла (received) 05.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лещинський Володимир Олександрович (Лещинский Владимир Александрович, Leshchynskiy Volodymyr Oleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua

Лещинська Ірина Олександрівна (Лещинская Ирина Александровна, Leshchynska Irina Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

D. E. DVUKHGLAVOV, A. V. DOLGORUKOV, S. R. SHOVKOPLIAS

DEVELOPMENT OF THE MODEL OF A DOMAIN REPRESENTATION IN THE DECISION SUPPORT SYSTEMS

The amount of information to be processed to make effective and informed decisions in the enterprises management in modern conditions of social development necessitates the use of decision support systems (DSS). Systems of this class provide storage and processing of large volumes of necessary information in a certain domain. At the same time, the high dynamism of the modern world leads to the fact that the domain represented in the system may change. This feature of modern conditions of DSS use determines the relevance of ensuring the adaptability of this systems class. This article presents the results of research on improving considered systems adaptability by providing the possibility of the modifying domain model represented in system being without making changes to the software architecture. The studies were aimed at resolving the discrepancy between the requirements of the systems adaptation efficiency to new functioning conditions and the actual duration of the existing adaptation procedures. It is shown that the traditional approach to the model representation, based on the mapping of the domain model in the relational database structure requires the involvement of specialists in the databases development and data access software. Standard procedures for the execution of such applications can take a long time. The approach which assumes that the domain model is stored in a special type of database in which the description of real objects, their attributes, attribute values and relations between them become records in the tables of such a database has been proposed as a solution for the discrepancy. This determines the possibility of the domain model modifying by changing of the tables contents without modifying structure of such database. To determine the such database structure, the domain representation model formalized description based on set theory has been made. The proposed approach is the basis for a software system design, using which will allow to modify the specific domain model directly by decision makers without involving correspond software developers. The primarily implementation area of the proposed solution is data-oriented DSS.

Keywords: decision support systems, domain model, description of the object by a set of characteristics, adaptability of decision support systems, modification of the domain model.

Д. Е. ДВУХГЛАВОВ, А. В. ДОЛГОРУКОВ, С. Р. ШОВКОПЛЯС

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Обсяг інформації, що підлягає обробці для вироблення ефективних і обґрунтованих рішень при управлінні підприємствами в сучасних умовах розвитку суспільства, викликає необхідність використання систем підтримки прийняття рішень (СППР). Системи такого класу забезпечують зберігання і обробку великих обсягів необхідної інформації в певній предметній області. При цьому висока динамічність сучасного світу призводить до того, що модель предметної області, що представляється в системі, може змінюватися. Така особливість сучасних умов застосування СППР обумовлює актуальність систем даного класу. У даній статті представлені результати досліджень, присвячених підвищенню адаптивності розглянутих систем за рахунок забезпечення можливості модифікації моделі предметної області, що представляється у СППР, без внесення змін в архітектуру програмного забезпечення. Дослідження були спрямовані на розв'язання суперечності між вимогами оперативності адаптації систем до нових умов функціонування і реальною тривалістю існуючих процедур адаптації. Показується, що традиційний підхід до подання моделі, заснований на відображенні моделі предметної області в структурі реляційної бази даних, в разі необхідності зміни вимагає залучення фахівців з розробки баз даних і програмного забезпечення для доступу до даних. Стандартні процедури виконання таких модифікацій можуть розтягнутися на досить тривалий час. В якості рішення пропонується підхід, який передбачає зберігання моделі предметної області в базі даних спеціального виду, при якому опис реальних об'єктів, їх атрибутів, значень атрибутів і відносин між ними стають записами в таблицях такої бази даних. Це визначає можливість модифікації моделі предметної області шляхом зміни вмісту таблиць такої бази даних без модифікації структури. Для визначення структури такої бази даних виконано формалізований опис моделі представлення предметної області на основі теорії множин. Запропонований підхід є основою для розробки створення програмної системи, застосування якої дозволить модифікувати модель конкретної предметної області безпосередньо фахівцями щодо прийняття рішень без залучення представників розробника відповідної системи. Сферою впровадження запропонованого рішення є перш за все СППР, орієнтовані на дані.

Ключові слова: системи підтримки прийняття рішень, модель предметної області, опис об'єкту набором характеристик, адаптивність систем підтримки прийняття рішень, модифікація моделі предметної області.

Д. Э. ДВУХГЛАВОВ, А. В. ДОЛГОРУКОВ, С. Р. ШОВКОПЛЯС

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Объем информации, подлежащей обработке для выработки эффективных и обоснованных решений при управлении предприятиями в современных условиях развития общества, вызывает необходимость использования систем поддержки принятия решений (СППР). Системы такого класса обеспечивают хранение и обработку больших объемов необходимой информации в некоторой предметной области. При этом высокая динамичность современного мира приводит к тому, что модель предметной области, представляемой в системе, может изменяться. Такая особенность современных условий применения СППР обуславливает актуальность обеспечения адаптивности систем данного класса. В данной статье представлены результаты исследований, посвященных повышению адаптивности рассматриваемых систем за счет обеспечения возможности модификации модели представляемой предметной области без внесения изменений в архитектуру программного обеспечения. Исследования были направлены на разрешение противоречия между требованиями оперативности адаптации систем к новым условиям функционирования и реальной продолжительностью существующих процедур адаптации. Показывается, что традиционный подход к представлению модели, основанный на отображении модели предметной области в структуре реляционной базы данных, в случае необходимости изменения требует привлечения специалистов по разработке баз данных и программного обеспечения для доступа к данным. Стандартные процедуры выполнения таких модификаций могут растянуться на достаточно длительное время. В качестве решения предлагается подход, который предполагает хранение модели предметной области в базе данных специального вида, при котором описание реальных объектов, их атрибутов, значений атрибутов и отношений между ними становятся записями в таблицах такой базы данных. Это определяет возможность модификации модели предметной области путем изменения содержимого таблиц такой базы данных без модификации структуры. Для определения структуры такой базы данных выполнено формализованное описание модели представления

© D. E. Dvukhglavov, A. V. Dolgorukov, S. R. Shovkopliass, 2018

предметной области на основе теории множеств. Предложенный подход является основой для разработки создания программной системы, применение которой позволит модифицировать модель конкретной предметной области непосредственно специалистами по принятию решений без привлечения представителей разработчика соответствующей системы. Сферой внедрения предложенного решения являются прежде всего СППР, ориентированные на данные.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений, модель предметной области, описание объектов набором характеристик, адаптивность систем поддержки принятия решений, модификация модели предметной области.

Introduction.

The effectiveness of activities in most industries is determined by the quality of decisions that are made. Decisions can be considered "good" if in the process of their preparation all known factors are analyzed, possible consequences of the decisions taken are determined, they are accepted by the deadline. Such an approach is important for the management of enterprises, for predicting the development of economic situations, in military affairs, in medicine, in power engineering, etc.

The amount of information to be processed to make effective and informed decisions in the enterprises management in modern conditions of social development necessitates the use of decision support systems (DSS). Systems of this class provide storage and processing of large volumes of necessary information in a certain domain.

At the same time, the high dynamism of the modern world leads to the fact that the domain area represented in the system may change. This feature of modern conditions of DSS application determines the relevance of research on improving the adaptability of this class systems.

Literature review and problem statement.

General decision making issues are presented in [1–3]. Questions on the purpose of DSS, their classification, their structure and principles of development can be found in [4–6]. In [6] presented in particular the definition of DSS, which is considered in the research. Decision Support System (DSS) is a computer-aided computer system whose goal is to provide assistance to decision makers in difficult conditions for a complete and objective analysis of the subject activity. DSS in most cases is an interactive automated system that helps decision makers use data and models to identify and solve problems and make decisions.

Requirements defined for the DSS, include one which considered that in such a class of systems it is necessary to ensure the possibility of adapting changes to requirements and external conditions for making decisions. In turn, the provision of such a "flexibility" contributes to improving the reliability of systems, which refers to the ability of the system to perform the required functions over a long period [7].

Adaptability of data-oriented DSS can be achieved by quickly changing the domain model presented in the DSS. Traditionally, the domain model in such systems is implemented in the tables structure of the DSS data management system. The most common is the variant of organizing data storage in relational databases [8, 9]. If the database structure changes, either the field (s) will be added to a specific table, or a new table will be added. Modern development practices suggest that a graphical user interface is being developed to fill tables with data. This can be either desktop forms or web-pages. Changes in the structure will necessarily require changes to the data

entry interface. In work [10] it is shown that at the present time to modify the DSS database and the interface for its content only specialists with special knowledge and skills can be involved. Taking into account the fact that these specialists and users are often far from each other, the time for modifying the database structure and software modules for data manipulation can take quite a long time, makes relevant the possibility of making changes by users of the system.

Thus, it can be argued that there is a contradiction between the requirements of the efficiency of adapting systems to new operating conditions and the actual duration of the existing adaptation procedures. The solution may be to modify the database structure without the participation of programmers and without refactoring software components.

An approach to solving this problem was proposed in [10]. But practical developments have shown that the presented approach does not take into account the existence of a connection between typical objects of the region.

The purpose of the article.

The purpose of the article is improving a method of structuring information about the domain, which used in decision making process, due to the representation in models of the relationship between the objects of the domain.

Representation domain method improvement.

The essence of an approach to structuring is based on a fact that a subject industry is a set of objects. Each object describes a set of characteristics whose values form a clear idea of it. Experts should define types of classes for the structuring of the subject industry. Such a division will allow organizing the characteristics in a bulk form and provide in a certain sequence according to user requirements. The principle of representing the types of objects is demonstrated in Fig. 1. Formally the type of TOb_i objects can be described as follows

$$TOb_i = \langle NTOb_i, RATO b^i \rangle, \quad (1)$$

where $NTOb_i$ – a name of a type;

$RATO b^i$ – a set of descriptions characteristics associated with this type

$$RATO b^i = \{RA_m^{ij}\}. \quad (2)$$

Each element of a $RATO b^i$ set corresponds to establishing a connection between an object type and the corresponding characteristic:

$$RA_m^{ij} \Leftrightarrow A_m \rightarrow TOb_j. \quad (3)$$

It is assumed that there is a set of characteristics $A = A_1, A_2, \dots, A_{m-1}, A_m, A_{m+1}, \dots, A_M$, which can be used to describe any type of an object.

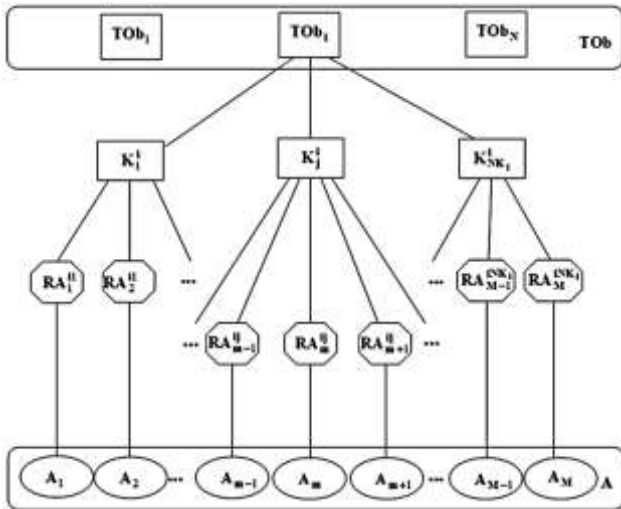


Fig. 1. Structure of representation of a typical object of the subject field

Also, when establishing a connection "object type-characteristic", a class K_{ij} ($K_j^i \in K^i$, K^i is a set of classes of the i -th type defined for the content structuring of the characteristics) is defined, to which a characteristic will be included, as well as restrictions are determined on the value of the characteristic RA_m^{ij} . So:

$$RA_m^{ij} = \langle A_m, K_{ij}, PA_m^{ij} \rangle. \quad (4)$$

Thus, a feature is included in only one class K_{ij} . The list of PA_m^{ij} limits depends on the type of value of the characteristic and differs when using the characteristic to describe objects of different types. The field of use of the method allows one to determine that the characteristic can store the value of one of six types: integer values (not a small part is allowed); numeric (the small part is allowed); symbolic; logical (true or false); date and time.

For each characteristic, restrictions are set for acceptable values. If a characteristic type is set to "listed", then a pre-defined set of possible values from which you can choose the desired option is pre-defined for it. For non-listed characteristics, values are arbitrary.

Depending on the type of values, one can set additional parameters. Thus, the method assumes that the logical value is an enumerated value with two possible values - "yes" and "no". For character non-listed values, one must set a maximum length of a value. For other types, if an arbitrary value is taken, maximum and minimum values that will determine the range of possible values should be set.

Part of the information on the domain is determined by the presence of different objects of relations of different types TL_r , $TL_r \in TL$. The ratio is binary and is set between the object types. Relationships of one type can be established between different types of objects. The set of relations taking place in the domain is a set $TLOB$:

$$TLOB = \{ TLOB_s \} =$$

$$= \{ \langle TOB_p, TOB_q, TL_r, RAL^{pqr} \rangle \}. \quad (5)$$

Relationships can also have attributes that are described in the same way with the attributes of object types, that is, they are also formed a description RAL^{pqr} , which defines the values range of attribute A_m , which is used to describe the type TL_r between objects types TOB_p and TOB_q . The difference is that the relationship characteristics are not structured. This is determined by the fact that the number of attributes describing the relationship does not usually exceed 5. Thus, we obtain:

$$RAL^{pqr} = \{ \langle RAL_m^{pqr} \rangle \} = \{ \langle A_m, PAL_m^{pqr} \rangle \}. \quad (6)$$

The structure of a typical description of the relationship between objects is illustrated in Fig. 2.

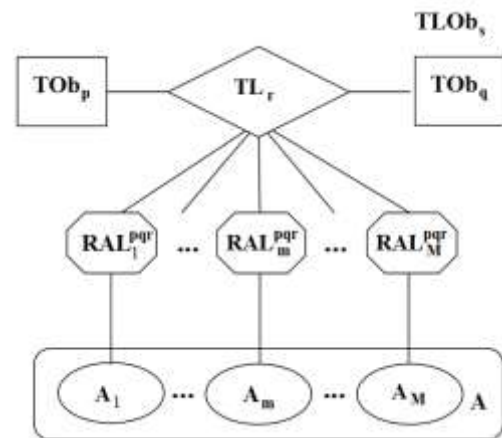


Fig. 2. The structure of the description of the typical relationship between objects

On the basis of certain types of objects, objects will be created next to certain objects of the domain:

$$Ob_n^i = Ob(TOb_i) = \langle NOB_n^i, ZA_n^i \rangle, \quad (7)$$

where NOB_n^i – a object name;

$ZA_n^i = \{ ZA_m^{in} \}$, $ZA_m^{in} \in PA_m^{ij}$ – a value set of n -th object i -th type.

This will characterize the transition from a general description of the domain structure to the detailed one. The defined structure of a particular Ob_n^i object in this case contains the values of corresponding characteristics ZA_m .

Fig. 3 illustrates how the information will be presented to the user.

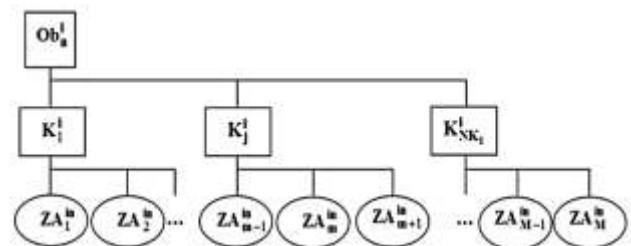


Fig. 3. The structure of i -th object instance

After creating certain objects between them, the relation of this form is established:

$$LOb_j^s = \{ LOb_s \} = \\ = \langle TOb_k^p, TOb_t^q, TL_r, ZAL_m^{ktr} \rangle. \quad (8)$$

Each of these relationships is created on the basis of a predefined relationship type $LOb_s = LOb(TLOB^s)$. TOb_k^p and TOb_t^q – these are instances of objects defined in the typical description of the relation $TLOB^s$; the relation characteristics take values from the corresponding values set defined for them when creating the type of relation:

$$ZAL_m^{ktr} \in PAL_m^{pqr}. \quad (9)$$

The structure of the relationship between certain objects is illustrated by Fig. 4.

Establishing relationships between types has the following features:

- relationships between different types can be established between two types of objects;
- a relationship between the types is characterized by a different set of characteristics;
- a list of types of relations coincides with the types of binary relations that are established between the entities of the database.

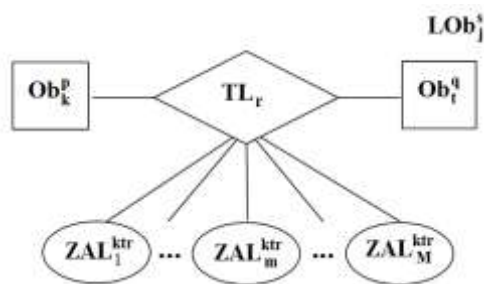


Fig. 4. The structure of the relationship between two objects instances

The principles for defining a set of characteristics for relations are similar to setting characteristics for an object type. Often, such a set is empty, because the importance of the presence of the relationship is important. Practical developments indicate that the number of relationship characteristics is not very large, so structuring on the classes is not used.

To create a domain model in accordance with the proposed principles, it is necessary to develop a structure for storing model components and a software system for working with them. When forming the requirements for the system architecture of the software system, the features of enterprise management should be taken into account. presents the requirements that the developed system should be placed on the server and provide a convenient interface to the user through the desktop client ("thick client" – for visual and interactive visualization), and through a browser ("thin client" – fewer features, but access is possible with any computer, without any preset). In addition, in the same work it is proposed to provide for the possibility of integration with existing accounting

systems of enterprises [11]. In modern conditions, a promising direction should be considered integration with SAP [12].

Conclusions.

Thus, the set of object types, their characteristics, relations between them allows us to represent the subject area of the decision-making task. Creating a domain model in accordance with the proposed approach has a similar sequence with the creation of the database table structure. But the proposed method provides the creation of an interface for inputting model components that describe an arbitrary subject area. The presence of such an interface will allow changing the create or change the domain model by decision makers in the case of expanding its boundaries. It should also be noted that the creation of such an interface will allow you to enter information about new objects immediately after creating the object type and determining (adding) characteristics and relations. This, in turn, increases the level of adaptability of DSS, first of all, of data-oriented DSS.

References

1. Черняховская Л. Р. *Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерий знаний*. Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. 168 с.
2. Афоничкин А. И., Михаленко Д. Г. *Управленческие решения в экономических системах*. Санкт Петербург: Питер, 2009. 480 с.
3. Александров О. В., Двухглавов Д. Е., Павленко М. А., Романенко І. О., Тимочко О. І. *Теоретичні основи автоматизації процесів вироблення рішень в системах управління Повітряних Сил*. Харків: ХУ ПС, 2010. 172 с.
4. Герасимов Б. М., Дивизинюк М. М., Субач І. Ю. *Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности*. Севастополь: Изд. центр СНИЯЭиП, 2004. 320 с.
5. Ситник В. Ф. *Системы підтримки прийняття рішень*. Київ: КНЕУ, 2004. 614 с.
6. Бідок П. І., Гожій О. П., Коренюк Л. О. *Комп'ютерні системи підтримки прийняття рішень*. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. 382 с.
7. Верескун В. Д., Цуриков А. Н. *Информационно-управляющие системы в научных исследованиях и производстве*. Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. 76 с.
8. Пасічник В. В., Реаніченко В. А. *Організація баз даних та знань*. Київ: BHV, 2006. 384 с.
9. Коннолли Т., Бегг К. *Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика*. Москва: Вильямс, 2017. 1440 с.
10. Судаков Б. Н., Двухглавов Д. Е., Володіна І. М. *Метод структуризації предметної галузі в системах підтримки прийняття рішень*. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Інформатика і моделювання*. Харків: НТУ «ХПИ». 2011. № 17. С. 157–161.
11. Скобелев П. О. *Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени на основе мультиагентных технологий*. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss_conf/15/6_01.pdf (accessed 15.11.2018)
12. *Офіційна веб-сторінка компанії SAP*. URL: <https://www.sap.com/ukraine/index.html> (accessed 15.11.2018).

References (transliterated)

1. Chernjahovskaja L. R. *Podderzhka prinjatija reshenij pri strategicheskom upravlenii predpriyatijem na osnove inzhenerij znaniy* [Decision support in strategic enterprise management based on knowledge engineering]. Ufa, AN RB, Gilem Publ., 2010. 168 p.
2. Afonichkin A. I., Mihalenko D. G. *Upravlencheskie reshenija v jekonomicheskijh sistemah* [Management solutions in economic systems]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2009. 480 p.

3. Aleksandrov O. V., Dvukhhlavov D. E., Pavlenko M. A., Romanenko I. O., Tymochko O. I. *Teoretychni osnovy avtomatyzatsiyi protsesiv vyroblennya rishen' v systemax upravlimyia Povitryanykh Syl* [Theoretical basis of automation of decision-making processes in Air Force control systems]. Kharkiv, KhU PS Publ., 2010. 172 p.
4. Gerasimov B. M., Divizinjuk M. M., Subach I. Ju. *Sistemy podderzhki prinyatija reshenij: proektirovanie, primenenie, ocenka jeffektivnosti* [Decision making support systems: design, application, performance evaluation]. Sevastopol', Izd.cent. SNIJaJeIP Publ., 2004. 320 p.
5. Sytnyk V. F. *Sistemy pidtrymky pryynyattya rishen' [Decision making support systems]*. Kiev, KNEU Publ., 2004. 614 p.
6. Bidyuk P. I., Hozhiy O. P., Korenyuk L. O. *Komp'yuterni systemy pidtrymky pryynyattya rishen' [Computer decision making support systems]*. Mykolayiv, ChDU im. Petra Mohyly Publ., 2012. 382 p.
7. Vereskun V. D., Curikov A. N. *Informacionno-upravljajushhie sistemy v nauchnyh issledovaniyah i proizvodstve* [Information management systems in research and production]. Rostov-na-Donu, FGBOU VO RGUPS Publ., 2016. 76 p.
8. Pasichnyk V. V., Reanichenko V. A. *Orhanizatsiya baz danykh ta znan' [Organization of bases of data and knowledge]*. Kiev, BHV Publ., 2006. 384 p.
9. Konnolli T., Begg K. *Bazy danyh. Proektirovanie, realizacija i soprovozhdzenie. Teorija i praktika* [Databases. Design, implementation and maintenance. Theory and practice]. Moscow, Vil'jams Publ., 2017. 1440 p.
10. Sudakov B.N., Dvukhhlavov D.E., Volodina I.M. *Metod strukturyzatsiyi predmetnoyi haluzi v systemakh pidtrymky pryynyattya rishen' [Method of structuring the subject area in decision making support systems]*. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI»: zb. nauk. pr. Temat. vyp.: Informatyka i modelyuvannya*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Informatic and Modelling]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2011. № 17. pp. 157–161.
11. Skobelev P.O. *Intellektual'nye sistemy upravlenija resursami v real'nom vremeni na osnove mul'tiagentnyh tehnologij* [Intelligent real-time resource management systems based on multi-agent technologies]. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss_conf/15/6_01.pdf (accessed 15.11.2018).
12. *Ofitsiyna web-storinka kompaniyi SAP* [Official web-page of the company SAP]. URL: <https://www.sap.com/ukraine/index.html> (accessed 15.11.2018).

Received 20.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Двухглавов Дмитро Едуардович (Двухглавов Дмитрий Эдуардович, Dvukhglavov Dmytro Eduardovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3361-3212>; e-mail: ddimae72@gmail.com

Долгоруков Олексій Веніамінович (Долгоруков Алексей Вениаминович, Dolgorukov Alexey Veniaminovich) – кандидат технічних наук, Національний дослідницький технологічний університет "МІСТАС", доцент кафедри «Бізнес-інформатика та системи управління виробництвом»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9779-4550>; e-mail: DolgorukovAV@misis.ru

Шовкоплас Сергій Ростиславович (Шовкоплас Сергей Ростиславович, Shovkoplias Serhii Rostislavovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-0213>; e-mail: sergey_shovkoplyas@outlook.com

D. L. ORLOVSKYI, A. M. KOPP, O. O. KUZMIN

INFORMATION SUPPORT FOR THE ANALYSIS OF SKILLS AND ABILITIES OF UNIVERSITY STUDENTS

In the below article, the application of the fuzzy logical conclusion method is considered as decision-maker in the process of analyzing the students skills and abilities based on the requirements of potential employers, in order to reduce the time of the first interview for potential candidates on a vacant position. When analyzing the results of the assessment of the competence of university students, a certain degree of fuzziness arises. In modern practice, fuzzy logic is used in many different assessment methods, including questioning, interviewing, testing, descriptive method, classification method, pairwise comparison, rating method, business games competence models, and the like. Each of the methods has its advantages and disadvantages, but they are effective only as part of a unified personnel management system. As a method for implementing a systematic approach to the assessment of the contingent of students, it is proposed to use fuzzy logic, a mathematical apparatus that allows you to build a model of an object based on fuzzy judgments. The use of fuzzy logic, the mathematical apparatus of which allows you to build a model of the object, based on fuzzy reasoning and rules. The most important condition for creating such a model is to translate the fuzzy, qualitative assessments used by man into the language of mathematics, which will be understood by the computer. The most used are fuzzy inferences using the Mamdani and Sugeno methods. In a fuzzy inference of the Mamdani type, the value of the output variable is given by fuzzy terms, in the conclusion of the Sugeno type, as a linear combination of the input variables. Research in the field of application of fuzzy logic in socio-economic systems suggests that it can be used to assess the competencies of university students.

Keywords: choice of alternatives, fuzzy logic, automated information system, fuzzy conclusion, fuzzy judgments, aggregation of alternatives

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, А. М. КОПП, О. О. КУЗЬМІН

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА АНАЛІЗУ НАВИЧОК ТА ЗДІБНОСТЕЙ КОНТИНГЕНТУ СТУДЕНТІВ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

У даній роботі розглянуто застосування методу нечіткого логічного висновку для підтримки прийняття рішень в задачах аналізу навичок та здібностей контингенту студентів виходячи з вимог потенційних роботодавців, з метою зменшення часу на первинну обробку інформації щодо потенційних кандидатів на вакантну посаду. Під час аналізу результатів оцінки компетентності студентів ВНЗ виникає певна ступінь нечіткості. У сучасній практиці нечітка логіка застосовується у багатьох різних методах оцінки, у тому числі анкетування, інтерв'ю, тестування, описовий метод, метод класифікації, парне порівняння, рейтинговий метод, ділові ігри моделі компетентності тощо. Кожен з методів має свої переваги та недоліки, але ефективні вони тільки в складі єдиної системи управління персоналом. Як метод для реалізації системного підходу до оцінки контингенту студентів запропоновано використовувати нечітку логіку, математичний апарат, який дозволяє побудувати модель об'єкту, засновану на нечітких розсудах і правилах. Використання нечіткої логіки, математичний апарат якої дозволяє побудувати модель об'єкта, що ґрунтується на нечітких міркуваннях і правилах. Найважливіша умова створення такої моделі полягає в тому, щоб перевести нечіткі, якісні оцінки, що застосовуються людиною, на мову математики, яка буде зрозуміла обчислювальній машині. Найбільш використовуваними є нечіткі висновки за допомогою способів Мамдані та Сугено. У нечіткому висновку типу Мамдані значення вихідної змінної задаються нечіткими термами, у висновку типу Сугено – як лінійна комбінація вхідних змінних. Дослідження в сфері застосування нечіткої логіки в соціоекономічних системах дозволяють говорити про можливість її використання для оцінки компетенцій студентів вищих навчальних закладів.

Ключові слова: вибір альтернатив, нечітка логіка, автоматизована інформаційна система, нечіткий висновок, нечіткі судження, агрегування альтернатив.

Д. Л. ОРЛОВСКИЙ, А. М. КОПП, А. О. КУЗЬМИН

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА АНАЛИЗА НАВЫКОВ И УМЕНИЙ КОНТИНГЕНТА СТУДЕНТОВ ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В данной работе рассмотрено использование метода нечеткого логического вывода для поддержки принятия решения в задачах анализа навыков и умений контингента студентов исходя из требований потенциальных работодателей, с целью уменьшения времени на первичную обработку информации касательно потенциальных кандидатов на вакантную должность. При анализе результатов оценки компетентности студентов вузов возникает определенная степень нечеткости. В современной практике нечеткая логика применяется во многих различных методах оценки, в том числе анкетирование, интервью, тестирование, описательный метод, метод классификации, парное сравнение, рейтинговый метод, деловые игры модели компетентности и тому подобное. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, но эффективны они только в составе единой системы управления персоналом. Как метод для реализации системного подхода к оценке контингента студентов предложено использовать нечеткую логику, математический аппарат, который позволяет построить модель объекта, основанную на нечетких суждениях. Использование нечеткой логики, математический аппарат которой позволяет построить модель объекта, основываясь на нечетких рассуждениях и правилах. Важнейшее условие создания такой модели заключается в том, чтобы перевести нечеткие, качественные оценки, применяемые человеком, на язык математики, которая будет понятна вычислительной машине. Наиболее используемыми являются нечеткие выводы с помощью способов Мамдани и Сугено. В нечетком выводе типа Мамдани значение выходной переменной задаются нечеткими термами, в заключении типа Сугено – как линейная комбинация входных переменных. Исследования в области применения нечеткой логики в социально-экономических системах позволяют говорить о возможности ее использования для оценки компетенций студентов вузов.

Ключевые слова: выбор альтернатив, нечеткая логика, автоматизированная система управления, нечеткий вывод, нечеткие суждения, агрегирование альтернатив.

Introduction. Systems based on fuzzy logic have been developed and successfully implemented in such areas as process control, transport, home appliances, medical and technical diagnostics, financial management, financial analysis, stock forecasting, pattern recognition,

risk and critical activity research, earthquake forecasting, assembly of bus schedules, climate control in buildings.

Most modern control problems cannot be solved simply by classical methods because of the very large complexity of mathematical models that describe them.

In today's conditions, more than ever, the issues of employment of university students are being considered. Also, the question appears about the students training, which should as much as possible answers to the employer's requirements.

The development of a decision-making mechanism for the objective assessment of students' knowledge and skills is actual subject for now. Such a task is poorly structured. In the conditions of incompleteness and inaccuracy of information, the construction of an exact mathematical model is problematic. On the other hand, the creation of a model of complex objects that is poorly formalized becomes difficult to implement. In this cases, the most effective are fuzzy simulation methods, which are largely based on knowledge of experts, on the basis of which, in turn, positive results can be obtained in the iterative process of refinement of a consistent model. In this regard, it is advisable to use the method of fuzzy logical conclusion for solving the problem of assessment and analysis of skills and competences of students of higher educational institutions.

Purpose of the study. The purpose of this work is to justify the practical use of fuzzy logical conclusions in order to make decisions in the selection of the most trained students for employment in an IT company. It will also help reduce the burden on HR managers and reduce the time spent on interviewing.

Analysis of recent research. In recent years, the number of publications on the theoretical and applied aspects of the processing of fuzzy information has increased. Software and hardware-software complexes have been developed to support decision-making based on fuzzy logic and knowledge with different levels of intelligence [1, 2].

The subject area of recent research is the applications in home appliances, medicine and other areas of human life [3–5]. It should be noted that the latest applied developments unite the direction of implementation of one of the possible modifications of the algorithms of fuzzy logical conclusion, namely, the composite conclusion.

Using fuzzy logic to assess competencies. In modern practice, fuzzy logic is used in many different evaluation methods, including questionnaires, interviews, testing, descriptive method, classification method, pair comparison, rating method, business models of competency, etc. [5, 6]. Each of the methods has its advantages and disadvantages, but they are effective only as part of a unified HR system. It is necessary that the evaluation methodology, which provides the basis for the implementation of functions of personnel management:

- was based on objective information and provided objective assessments of candidates;
- encouraged those who select to justify a decision based on an agreed system of criteria;
- ensured mutual understanding of the parties in the assessment of personnel [7];
- ensured implementation of management decisions.

When analyzing the results of staff assessment there is a certain degree of fuzziness. As a method for

implementing a systematic approach to personnel assessment, it is proposed to use fuzzy logic, a mathematical device that allows constructing a model of an object based on fuzzy discretions and rules. The most important condition for the creation of such a model is to translate the fuzzy, qualitative estimates that are used by a person into the language of mathematics, a computer that is understandable [8, 9]. Research in the field of fuzzy logic in socioeconomic systems [10] allows us to talk about the possibility of its use for assessing the competences of university students.

Formulation of the problem. A typical example of a selection problem is the consideration by the leadership of an organization of candidates for internships.

The task is to use the fuzzy inference method to identify the best bidder.

Let U – many elements, A – its fuzzy subset, the degree of membership of which is a number from the unit interval $[0, 1]$. Subset A are values of the linguistic variable X .

Let the set of solutions characterized by a set of criteria X_1, X_2, \dots, X_p , ie, linguistic variables on base sets U_1, U_2, \dots, U_p respectively. A set of several criteria with corresponding values characterizes the idea of satisfactory solution.

Variable S "satisfactorily" is also linguistic. Example of pronunciation:

d_1 : «if $X_1 = \text{low}$ and $X_1 = \text{good}$ then $S = \text{high}$ ».

In general, the expression is as follows:

d_i : «if $X_1 = A_{1,i}$ and $X_2 = A_{1,i}$ and ... $X_p = A_{1,p}$, then $S = B_i$ ».

We will mark the section $X_i = A_{1,i} \cap X_2 = A_{2,i} \cap \dots \cap X_p = A_{p,i}$ by $X = A_i$. The operations of the intersection of fuzzy sets correspond to finding the minimum of their membership functions:

$$\mu_{A_i}(y) = \min_{y \in V} \{ \mu_{A_{1,i}}(u_1), \mu_{A_{2,i}}(u_2), \dots, \mu_{A_{p,i}}(u_p) \},$$

where $V = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_p, i = (u_1, u_2, \dots, u_p)$, $\mu_{A_i}(u_j)$ – value of the element u_j of the fuzzy set $A_{i,j}$. Then the statement will look like:

d_i : «if $X = A_i$, then $S = B_i$ ».

Denote the base set through W . Then A^i – fuzzy subset W , while B^i – fuzzy subset of the unit interval I .

The implication of fuzzy sets is expressed in the following way:

$$\mu_H(w, i) = \min_{w \in W} \{ 1, (1 - \mu_A(w) + \mu_B(i)) \},$$

where H – fuzzy subset.

Similarly, the statement d_1, d_2, \dots, d_q converted into plural H_1, H_2, \dots, H_q .

Their association is plural D :

$$D = H_1 \cup H_2 \cup \dots \cup H_q$$

and for everyone $(w, i) \in W \times I$:

$$\mu_D(w, i) = \min_{w \in W} \{ \mu_{H_i}(w, i) \}, i = 1, 2, \dots, q.$$

Consider the choice of alternatives, each of which is described by a fuzzy subset C from a subset W . Satisfaction of the alternative is determined on the basis of the compositional rule of withdrawal. Then:

$$\mu_C(i) = \max_{w \in W} \{ \min \{ \mu_C(w), \mu_D(w, i) \} \}.$$

Comparison of alternatives is based on point estimates.

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha, x \in I\}.$$

For each A_α can calculate the average number of elements $M(A_\alpha)$:

$$M(A_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i + b_i}{2} (b_i + a_i)}{\sum_{i=1}^n (b_i + a_i)}.$$

Then the point value for the plural A :

$$M(A) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(A_\alpha) d\alpha,$$

where α_{\max} – value at which A has a maximum.

When choosing alternatives, satisfaction is determined for each of them and the corresponding point score is calculated. The best is considered an alternative with its greatest value [11, 12].

To solve the problem of identifying the best candidate for a particular job, we propose the use of client-server technology based on the use of the MySQL database server, the programming language PHP, JS, CSS, HTML. In the fragment of the data model, the following entities are represented.

The structure of the database is illustrated by the database fragment, which is shown in Figure 1. The given fragment shows the main essence (tables) through which data about students, their skills, competencies, levels of competences are stored.

The sequence of software use may be as follows. Students who are considered as potential candidates make tests or fill out questionnaires on the basis of which basic

information about their competences, knowledge and skills is formed. This information falls into the database. Then, with the help of software, the primary assessment of the contingent of students is carried out, on the basis of which a list of candidates is created, which is ranked by the value of the point estimate. These data are primary to select the most promising candidates, followed by an additional interview.

The task is to use the method of fuzzy logical conclusion to find the best bidder. An example of selecting a junior front-end developer for a specific position, the main requirements of which are:

- D1: «If the candidate has the skills to work with JS, CSS3, HTML5, then he satisfies (which meets the requirements)»;
- D2: «If it is with d1 has the skills to work with JQuery, then he more than satisfies»;
- D3: «If it is with d_1 has the skills to work with Bootstrap, then he more than satisfies»;
- D4: «If he has all the stipulated skills in d_1, d_2, d_3 , then he is impeccable»;
- D5: «If he do not have the skills to work with JS or CSS3 or HTML5, he does not satisfy».

The analysis of the five pieces of information gives the five criteria that are used to make a decision:

- X1 – the skill of working with JS;
- X2 – the skill of working with JQuery;
- X3 – the skill of working with CSS3;
- X4 – the skill of working with HTML5;
- X5 – the skill of working with Bootstrap.

Figure 2 depicts the rules for this competence.

We have 4 candidates to evaluate their competencies.

Information about candidates Candidate1 – Candidate4 is arbitrary, based on restrictions on the disclosure of personal data. Estimates for each candidate are presented in Table 1.

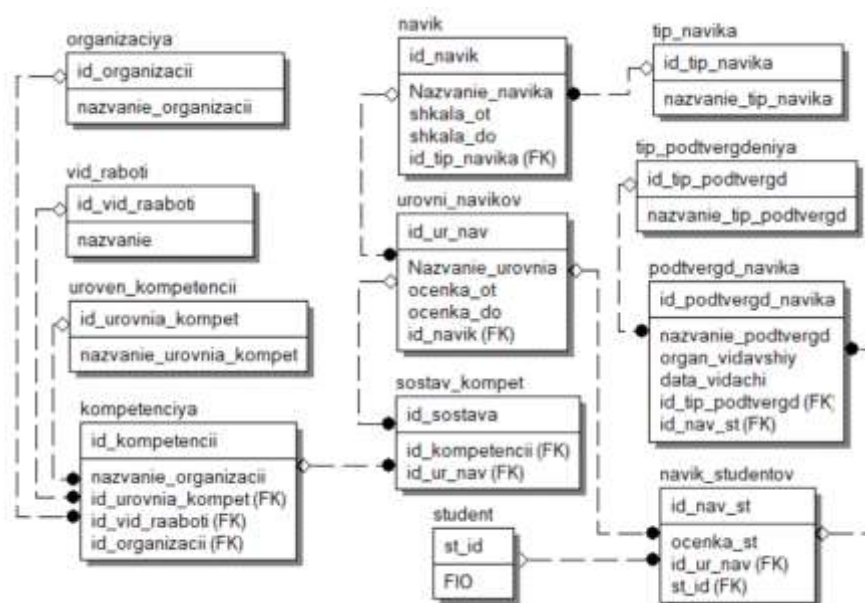


Fig.1. A fragment of the data model

Ид правила	Правило	
37	Если HTML и Bootstrap и CSS3 и JS то кандидат более чем удовлетворяющий	✖
38	Если HTML и CSS3 и JS то кандидат удовлетворяющий	✖
39	Если HTML и JQuery и CSS3 и JS то кандидат более чем удовлетворяющий	✖
40	Если HTML и JQuery и Bootstrap и CSS3 и JS то кандидат безупречный	✖
41	Если не HTML или не CSS3 или не JS то кандидат не удовлетворяющий	✖

Объединитель навыков: и Если Следовательно такой кандидат: удовлетворяющий кандидат ✖

Fig. 2. Rules of competence

Table 1 – Estimates for each candidate

Candidates	Skills				
	JS	JQuery	CSS3	HTML5	Bootstrap
Candidate1	0.8	0.5	0.5	0.1	0.3
Candidate2	0.6	0.78	0.8	0.77	0.5
Candidate3	0.3	0.8	0.33	0.5	0.2
Candidate4	0.3	0.2	0.75	0.78	0.8

Thus, using the software developed, we can give a point-by-point evaluation to each candidate and draw conclusions about which candidate is best suited for this vacancy.

Figure 3 shows the results of the evaluation of candidates with the help of the developed software.

Фамилия	Имя	Отчество	Оценка
Candidate2	Candidate2	Candidate2	0.7041
Candidate4	Candidate4	Candidate4	0.4957
Candidate3	Candidate3	Candidate3	0.4425
Candidate1	Candidate1	Candidate1	0.3

Fig. 3. Results of the analysis

The dot satisfaction rating for the alternative candidate1 is 0.3, for candidate2 it is 0.7041, candidate3 – 0.4257 and candidate4 – 0.4957. As the best alternative, we select the candidate with the highest score. Table 2 shows the rating of candidates.

Conclusion. The results of the study suggest that the use of the fuzzy logic method favors the selection of the most suitable candidates for a particular position and thereby reduces the time spent on processing information

about candidates by HR-manager of the company, which interacts not with dozens but with hundreds of candidates. This methodology gives information about the candidates, and the final decision is made by the person who has this authority.

The considered methodology for evaluating the competence of specialists can be adapted for other spheres, taking into account the specifics of the enterprise and the features of the personnel management system.

References

1. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. *Анализ, синтез, планирование решений в экономике*. Москва: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
2. Коваленко И. И., Фарionoва Т. А., Приходько С. Б. *Методы принятия решений*. Николаев: НУК, 2009. 180 с.
3. Крап Н. П., Юзевич В. М., *Управление развитием складных систем*. Львів: Принт200, 2012. 132 с
4. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*. Vol. 17. P. 141–164.
5. Кибанов А. Я. *Управление персоналом организации*. Москва: Инфра-М, 2010. 638 с.
6. Иванова С. В. *Искусство подбора персонала. Как оценить человека за час*. Москва: Альпина Паблишерз, 2011. 230 с.
7. Магура М. И., Курбатова М. Б. *Современные персональные технологии*. Москва: Управление персоналом, 2003. 384 с.
8. Piegat A. *Fuzzy Modeling and control*. Szczecin: Springer, 2001. 772 p.

Table 2 – Rating of candidates

Candidates	Skills					Spot assessment
	JS	JQuery	CSS3	HTML5	Bootstrap	
Candidate2	0.6	0.78	0.8	0.77	0.5	0.7041
Candidate4	0.3	0.2	0.75	0.78	0.8	0.4957
Candidate3	0.3	0.8	0.33	0.5	0.2	0.4425
Candidate1	0.8	0.5	0.5	0.1	0.3	0.3

9. Круглов В. В., Дли М. И., Голубов Р. Ю. *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. Москва: Физматлит, 2001. 347 с.
10. Кулик Р. В. Применение принципов нечеткой логики в методологии BSC. *Экономические науки*. 2009. № 7 (56). С. 322–325.
11. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. *Принятие решений на основе нечетких моделей*. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
12. Zeng J., Liu Z. Q. Type-2 fuzzy sets for handling uncertainty in pattern recognition. *Proc. «FUZZ-IEEE»*. Vancouver, 2006. P. 6597–6602.
5. Kibanov A. Ya., *Upravlenie personalom organizatsii* [Organization Personnel Management]. Moscow: Infra-M Publ., 2010. 638 p.
6. Ivanova S. V. *Iskusstvo podbora personala. Kak otsenit cheloveka za chas* [The art of recruitment. How to evaluate a person in an hour]. Moscow: Alpina Publishers Publ., 2011. 230 p.
7. Magura M. I., Kurbatova M. B. *Sovremennyye personal-tehnologii*. [Modern personnel technologies]. Moscow: Upravlenie personalom Publ., 2003. 384 p.
8. Piegat A. *Fuzzy Modeling and control*. Szczecin: Springer, 2001. 772 p.
9. Kruglov V. V., Dli M. I., Golubov R. Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti* [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 347 p.
10. Kulik R. V. *Primenenie printsipov nechetkoy logiki v metodologii BSC* [Application of Fuzzy Logic Principles in the Methodology of BSC]. *Jekonomicheskie nauki*, 2009, no. 7 (56), pp. 322–325
11. Borisovand A. N., Krumbergand O. A., Fedorov I. P. *Prinyatie resheniy na osnove nechetkih modeley* [DecisionMakingBasedonFuzzyModels], Riga: Zinatne Publ., 1990. 184 p.
12. Zeng J., Liu Z. Q. Type-2 fuzzy sets for handling uncertainty in pattern recognition. *Proc. «FUZZ-IEEE»*. Vancouver, 2006. P. 6597–6602.

References (transliterated)

1. Andreichikov A. B., Andreichikova O. N. *Analiz, sintez, planirovanie resheniy v ekonomike* [Analysis, synthesis, planning decisions in the economy]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 2000. 368 p.
2. Kovalenko I. I., Farionov T. A., Prikhodko S. B. *Metodyi prinyatiya resheniy* [Decision-making methods]. Nikolaev: NUK Publ., 2009. 180 p.
3. Krap N. P., Yuzevich V. M. *Upravlnnyia rozvitkom skladnih sistemenyi* [Managing the development of folding systems]. Lviv: Pront200 Publ., 2012. 132 p.
4. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment, *Management Science*, 1970. pp. 141–164.

Received 05.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Орловський Дмитро Леонідович (Orlovskiy Dmitriy Leonidovich, Orlovskiy Dmitro Leonidovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua.

Копп Андрій Михайлович (Kopp Andriy Mykhailovych, Kopp Andrii Mykhailovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com.

Кузьмін Олексій Олегович (Kuzmin Aleksey Olegovich, Kuzmin Oleksii Olegovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-9477>; e-mail: oleksii.kuzmyn@gmail.com.

M. A. ZARUDNIEV, V. O. HUZHYA

COST AND COMPLEXITY RESEARCH OF SOFTWARE DEVELOPMENT TO SOLVE THE PROBLEM OF INVENTORY MANAGEMENT

The article describes the process of estimating the cost and complexity of software development for the task of inventory management of a commercial enterprise to improve the decision-making process at the stage of formation of requirements for similar software products. There are different approaches to inventory management of a commercial enterprise. The algorithms implemented in the system are based on the constraint theory tool – dynamic inventory buffer management. Inventory management according to the theory of restrictions allows to provide a high level of availability of goods with minimal inventory in the system. After analyzing the subject area of inventory management and the methodology of dynamic inventory buffer management, a list of functional and non-functional software requirements was formed, and a data model was designed. The information obtained was used to compile a list of logical files and transactions specific to a particular requirement. From the resulting list of files and transactions, it is determined which elementary data, elementary records and links to files they consist of. The information obtained was used to estimate the size of the software at non-aligned functional points. To take into account the impact of non-functional requirements on the complexity of software development, the VAF alignment factor was calculated, for which it is necessary to give a qualitative assessment of the impact of system-wide requirements on the complexity of the software. The estimation of the complexity of the development was obtained using the COCOMO II methodology, namely, using seven multipliers of the complexity for the case of the initial assessment at the stage of approval of requirements. The calculations were obtained for teams with different professional level and equipment, in the conditions of a significant tightening of the development process, a high level of certainty of risks, without a rigid schedule of work. The cost of development was calculated for several common programming languages: J2EE, C#, C++.

Keywords: software, evaluation methods of cost and complexity, COCOMO II method, the task of managing vending inventory based on demand.

M. A. ЗАРУДНІЄВ, В. О. ГУЖВА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРТОСТІ ТА ТРУДОМІСТКОСТІ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ПІДПРИЄМСТВА

У статті описується процес оцінки вартості і трудомісткості розробки програмного забезпечення задачі управління запасами торговельного підприємства для поліпшення процесу прийняття рішень на етапі формування вимог до аналогічних програмних продуктів. Існують різні підходи до управління запасами торгового підприємства. Алгоритми, реалізовані в системі засновані на інструменті теорії обмежень – динамічному управлінні буфером запасів. Управління запасами з теорії обмежень дозволяє забезпечити високий рівень наявності товару при мінімальних запасах в системі. Проаналізувавши предметну область управління запасами і методологію динамічного керування буфером товарних запасів був сформований список функціональних і нефункціональних вимог до програмного забезпечення, а також спроектована модель даних. Отримана інформація була використана для складання переліку логічних файлів і транзакцій, характерних для конкретної вимоги. З отриманого списку файлів і транзакцій визначено, з яких елементарних даних, елементарних записів і посилань на файли вони складаються. Отримана інформація була використана для оцінки розміру програмного забезпечення в не вирівняних функціональних точках. Для обліку впливу функціональних вимог на трудомісткість розробки програмного забезпечення був порохований фактор вирівнювання VAF, для чого необхідно дати якісну оцінку впливу загальносистемних вимог на трудомісткість програмного забезпечення. Оцінка трудомісткості розробки була отримана з використанням методології COCOMO II, а саме з використанням семи множників трудомісткості для випадку первинної оцінки на етапі затвердження вимог. Розрахунки були отримані для команд з різним професійним рівнем і устаткуванням, в умовах значного посилення процесу розробки, високим рівнем визначеності ризиків, без жорсткого графіка робіт. Вартість розробки була розрахована для декількох поширених мов програмування: J2EE, C#, C++.

Ключові слова: програмне забезпечення, методи оцінки вартості та трудомісткості, метод COCOMO II, задача управління торговим інвентарем на основі попиту.

M. A. ЗАРУДНІЄВ, В. А. ГУЖВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОИМОСТИ И ТРУДОЁМКОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье описывается процесс оценки стоимости и трудоемкости разработки программного обеспечения задачи управления запасами торгового предприятия для улучшения процесса принятия решений на этапе формирования требований к аналогичным программным продуктам. Существуют различные подходы к управлению запасами торгового предприятия. Алгоритмы, реализованные в системе основаны на инструменте теории ограничений – динамическом управлении буфером запасов. Управление запасами по теории ограничений позволяет обеспечить высокий уровень наличия товара при минимальных запасах в системе. Проанализировав предметную область управления запасами и методологию динамического управления буфером товарных запасов был сформирован список функциональных и нефункциональных требований к программному обеспечению, а также спроектирована модель данных. Полученная информация была использована для составления перечня логических файлов и транзакций, характерных для конкретного требования. Из полученного списка файлов и транзакций определено, из каких элементарных данных, элементарных записей и ссылок на файлы они состоят. Полученная информация была использована для оценки размера программного обеспечения в не выровненных функциональных точках. Для учета влияния нефункциональных требований на трудоемкость разработки программного обеспечения был посчитан фактор выравнивания VAF, для чего необходимо дать качественную оценку влияния общесистемных требований на трудоемкость программного обеспечения. Оценка трудоемкости разработки была получена с использованием методологии COCOMO II, а именно с использованием семи множителей трудоемкости для случая первичной оценки на этапе утверждения требований. Расчеты были получены для команд с разным профессиональным уровнем и оборудованием, в условиях значительного ужесточения процесса разработки, высоким уровнем определенности рисков, без жесткого графика работ. Стоимость разработки была рассчитана для нескольких распространенных языков программирования: J2EE, C#, C++.

Ключевые слова: программное обеспечение, методы оценки стоимости и трудоемкости, метод COCOMO II, задача управления торговыми запасами на основе спроса.

Introduction. Modern Ukrainian trade enterprises of small and large businesses are faced with the problem of optimal inventory management. Neglect of this type of management activity can lead to significant material losses.

The most common solution to this problem is to manage inventory without or partially using automated tools. However, often trade enterprises are limited in funds allocated for management functions. Therefore, the management of the enterprise has to either neglect careful planning of reserves and suffer losses, or invest significant funds.

To minimize the described costs, the best solution at the moment will be the introduction of a full-fledged automated inventory management system at the trading enterprise. This will reduce the number of employees engaged in accounting, speed up cost planning and reduce the impact of the human factor. The process of developing inventory management software is complex and requires significant labor costs. The cost and complexity of its development depends on the size of the software, the level of competence of the developer, the presence of previous experience in the development of similar systems and many other factors [1].

At the stage of identifying the requirements for the system there is a need to assess the cost and complexity of the implementation of certain of its functionality and qualities, the relevance of which the more complex and large-scale project. Only highly qualified experts in the subject area of inventory management, whose availability requires additional financial costs, are able to carry out such an assessment with high accuracy immediately.

The main task of estimating the cost and complexity of software development is to support decision – making for optimal allocation of project resources at the stage of requirements formation [2].

Purposes and research problems. The purpose of this work is to assess the cost and complexity of software development to solve the problem of inventory management.

To achieve this goal, the article solves the following tasks:

- the analysis of methods for assessing the cost and complexity of software development and the choice of the most appropriate;
- the analysis of the subject area of inventory management of the enterprise;
- the methodology of inventory management of commercial enterprise with current demand on the basis of the tool of the theory of restrictions is described;
- detailed functional and non-functional software requirements as well as data model are developed;
- the estimation of the size and on its basis calculated the complexity and development time.

The subject of the study is the process of assessing the cost and complexity of software development. The size of the software is estimated according to the method of functional points, and the complexity – according to the

COCOMO II model.

The object of the study is the software for solving the problem of inventory management of commercial enterprises. Functional and non-functional requirements to it were put forward on the basis of the analysis of the subject area and methodology of inventory management of commercial enterprise.

Analysis of methods for estimating the cost and complexity of software development. Among the considered models for estimating the cost and complexity of software development, the COCOMO II model was singled out as the most popular and having sufficient accuracy to make an adequate decision in the framework of requirements management [3].

The most detailed model that is used when the project is fully ready for development uses 17 multipliers of labor intensity (cost factors) and 5 factors that determine the scale of the project. The model itself has the following form:

$$PM = A \cdot SIZE^E \prod_{i=1}^{17} EM_i,$$

where $SIZE$ – product size in KSLOC;

EM_i – multipliers of labor intensity.

$$E = B + 0,01 \sum_{j=1}^5 SF_j,$$

where SF_j – scale factors;

$A = 2,94$;

$B = 0,91$.

Values of EM_i and SF_j parameters are tabular [4].

Functional points method (Functional Points Analysis – FPA) is used to estimate software size in functional points. It allows you to estimate the size of the software product based on the functionality demanded by the customer and supplied by the developer. Evaluation of the number of functional points (FT) for the software product is derived from the data that are determined by the analysis of the information area and the study of the features of its future operation.

The evaluation procedure consists of the following steps [5]:

- 1) Definition of the boundary of the product.
- 2) Definition of data and transactions (operations on the data).
- 3) Counting the number of non-aligned function points.
- 4) Determination of factor values align (Value-Alignment Factor – VAF).
- 5) Counting aligned function points.

The complexity of the files depends on the number of logical data groups (Rets) and the number of unique data fields (DETS). The complexity of transactions depends on the number of different files modified or read in a transaction (FTR) and the number of unique data fields (DET). Each RET/FTR or DET component can have one of three difficulty levels: L – low, A – average, H – high. The method of function points of the matrix determines the complexity of the data file and transaction.

To account for the impact of non-functional requirements on the complexity of software development, there is a VAF alignment factor. For its calculation it is necessary to give a qualitative assessment of the impact of system-wide requirements on the complexity of the software.

Having received the necessary estimate of the size of the software, you can calculate the complexity of its development. To do this, you need to transfer the software size to SLOC according to the table 1:

Table 1 – Estimation of the number of lines of code of one functional point

Computer language	Estimation of the number of lines of code of one functional point		
	Likely	Optimistic	Pessimistic
C	148	9	704
C++	60	29	178
C#	59	51	66
J2EE	61	50	100
JavaScript	56	44	65
Visual Basic	50	14	276

Analysis of the methodology of stock management of the commercial enterprise based on the current demand. Dynamic buffer management (*eng.* DBM) – a tool of the theory of constraints (THAT), which allows you to effectively manage the reserves of the enterprise, focusing on the actual demand of consumers [6].

The purpose of the DBM algorithm is to track the current buffer level to decide whether the target level is too low or too high.

Key TO ideas for inventory management [7]:

1) Take into account not only the stock in stock, but also the goods in transit, that is, all open purchase orders must be part of the mechanism to ensure the availability of goods. The target level determines the inventory buffer, including both on-hand inventory and open orders.

2) The target level does not change until a clear signal is received that it is unacceptable.

3) Regular replenishment of the target level.

Inventory buffer-a target level of inventory that is set and maintained in the supply chain to meet customer demand, taking into account fluctuations in demand and delivery times. It is necessary in order to maintain the right amount of inventory in the system and to ensure constant availability of the product for the customer. At the same time, the system should not have excess reserves, freeze working capital, that is, the amount of reserves in the system should be minimal.

The buffer determines the quantity of the required goods for sale from delivery to delivery. Its size is analyzed by the system on a daily basis and automatically changes depending on the intensity of the balance change. If the balance dominates in the green zone – the system reduces the buffer in the red-increases to the upper value of the buffer (replenishment level).

When the stock in any link of the supply chain falls below the level of the replenishment, it must immediately

be replenished to this level. Using an immediate response to the actual sale eliminates the need to forecast sales in the short and medium term [8].

The inventory buffer is divided into several zones, which are shown in Fig. 1 [9].

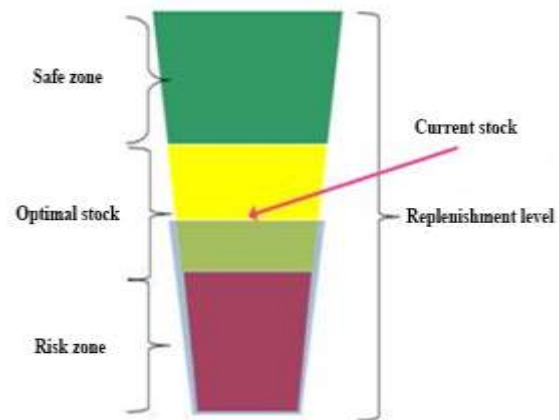


Fig. 1. Structure of buffer stocks

Buffer management is an automated procedure for analyzing the inventory buffer and automatically making changes that reflect changes in demand up or down. Properly configured, buffer management significantly reduces replenishment time and dramatically increases the number of timely deliveries [10].

The initial buffer size is calculated as the maximum consumption per delivery cycle. The delivery cycle takes into account the duration and frequency of delivery. The maximum consumption is determined from previous sales statistics or is set manually. TOC buffer management is able to analyze actual consumption and make recommendations on targets, according to the logical rule above. The rule suggests taking into account the high consumption during the replenishment period, taking into account the variability in the various factors of replenishment time. The higher the target service level, the more variability needs to be considered.

The size of the item buffer can be set individually for each of the warehouses throughout the supply chain, including retail outlets, retail chains and dealers' warehouses.

Individual parameters of dynamic buffer [11]:

- the level of replenishment basic units of measurement;
- red and green zone size as a percentage of replenishment level, replenishment period (in days);
- red and green zone penetration audit periods (in days), minimum inventory level;
- accounting for the supply forecast for the replenishment period.

After the settlement of the target buffer level, the system makes the ordering provider of goods.

Defining software requirements. After analyzing the subject area of inventory management and the methodology of dynamic inventory buffer management, you can create a list of functional requirements for the software in General:

- 1) User Authorization in the system.
- 2) Inventory control.
- 3) Dynamic buffer management of the inventory.
- 4) Automatic formation of an order for the supply of goods.

- 5) Export the report the dynamics of buffer stocks.
- 6) Receiving of user manual.

In addition to functional requirements, the product is also subject to system-wide requirements of General Systems Characteristics (GSCs), which restrict developers in choosing a solution and increase the complexity of development. The following list of non-functional requirements is selected for the study:

1) Data exchange. The process of communication between the database server and the application server must be fault-tolerant.

2) Performance. Operations available in the software must not be performed for more than 5 seconds.

3) Hardware resource limits.

4) Transactional load. The time to recover from a failure caused by a hardware power failure (other external factors), not a fatal operating system failure, should not exceed the time required to restart the server and refresh the connection page.

5) Intensity of user interaction. Time of work with is limited to the user's working schedule.

6) Ergonomics. The information system must meet the standards of the common user access (CUA) IBM.

7) Ease of administration. The functionality of the database administration needs to be made to a custom toolbar.

Results of calculation. As a result of the analysis of functional requirements to the inventory management software of the trading enterprise on the basis of the FPA method, the size of the software in the functional points was calculated: $FP = UAF * VAF = 340,24$.

As a result of the study of the complexity of software development using the COCOMO II method, the following dependencies of development complexity on labor input factors were obtained. The calculations were obtained for teams with different professional level and equipment, in the conditions of a significant tightening of the development process, a high level of certainty of risks, without a rigid schedule of work. The complexity of the development was calculated for several of the most common programming languages – J2EE, C#, C++ and listed in the table 2.

Based on these data, the estimated cost of developing a commercial enterprise inventory management software was calculated on the condition of 100% employment of all team members throughout the development period using the formula:

$$\sum_{i=1}^7 v_i \cdot \frac{PM}{7},$$

where v_i – salary of the i -th team member (UAH/month);

PM – the complexity of software development for this team (man-months).

Table 2 – Estimation of labor input for different programming languages

Team of developers	Estimation of labor intensity (man-months)		
	J2EE	C#	C++
Very weak	296,6	285	290,8
Weak	145,2	139,8	142,5
Satisfactory	77,2	74,5	75,9
Average	44,3	42,8	43,6
Strong	22	21,3	21,7
Very strong	11,5	11,1	11,3

The average salary of the worker as a programmer in terms of UAH (at the rate of NBU from 01.12.2018 [12]) is listed in the table 3.

Table 3 – Average salary of a worker as a programmer

	J2EE	C#	C++
Junior Software Engineer	19670	18265	19670
Software Engineer	53390	50580	59010
Senior Software Engineer	98350	94135	95540
Technical Lead	122235	121673	108888
System Architect	167195	134880	137690

The results are listed in the table 4.

Table 4 – Estimated cost of software development for inventory management of commercial enterprise (UAH)

Team of developers	Development cost		
	J2EE	C#	C++
Very weak	171410	160170	177030
Weak	205130	192485	216370
Satisfactory	283810	268355	292240
Average	386375	371763	381458
Strong	646300	596563	614688
Very strong	781180	727228	724278

Thus, it can be concluded that:

1) Development of projects in C++ for qualified teams in Ukraine is the cheapest, but for the least qualified teams on the contrary – the most expensive;

2) The cheapest development tool for all skill levels of teams in Ukraine is the use of the C language#.

3) J2EE is practically the most expensive development tool (except for C++ for teams with small qualifications).

The presence of a huge number of factors that directly or indirectly affect the process of software development, does not allow to give an accurate assessment of the software at the stage of requirements formation.

Conclusion. In this research work, based on the analysis of the subject area of the problem of inventory management of a trading enterprise, a study of the cost

and complexity of the development of appropriate software was conducted.

References

1. Ньютон Р. *Управление проектами от А до Я*. Москва: Альпина Бизнес Букс, 2007. 180с.
2. Архипенков С. *Лекции по управлению программными проектами*. URL: http://citforum.ru/SE/project/arkhipenkov_lectures/13.shtml (дата обращения 12.10.2018).
3. Садовский И. Д. Применение модели СОСОМО II для оценки разработки программного обеспечения в Windows проектах. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2016. № 10. С. 102–106.
4. Шанченко Н. И. Оценка трудоемкости разработки программного продукта: методические указания. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 40 с.
5. Сидоров Н. А., Баценко Д. В., Василенко Ю. Н., Щebetин Ю. В., Иванова Л. Н. Методы и средства оценки стоимости программного обеспечения. *Проблемы системного подходу в економіці*. 2004. № 7. С. 113 – 118.
6. Нагапетьянц Н. *Экономика предприятия: Учебник для вузов*. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 670 с.
7. Коуэн О., Федурко Е. *Основы Теории Ограничений*. Таллинн: TOC Strategic Solutions, 2012. 331 с.
8. Детмер У. *Теория ограничений Голдратта: Системный подход к непрерывному совершенствованию*. Москва: Альпина Бизнес Букс, 2008. 444 с.
9. Речкалов В. *Динамическое управление буфером*. URL: <http://tocpeople.com/2013/10/dinamicheskoe-upravlenie-buferom/> (дата обращения 10.10.2018).
10. Правук О. *Оптимизация запасов и ассортимента. Подход теории ограничений*. URL: <https://uppravuk.net/optimizatsiya-zapasov-i-assortimenta-podhod-teorii-ogranichenij/> (дата обращения 10.10.2018).
11. Корбетт Т. *Учёт прохода: Управленческий учёт по ТОС*. Киев: Необхідно і достатньо, 2009. 240 с.
12. *НБУ, Офіційний курс доллара на 01 грудня 2018*. URL: <https://minfin.com.ua/currency/nbu/usd/> (дата обращения 01.12.2018).
13. http://citforum.ru/SE/project/arkhipenkov_lectures/13.shtml (accessed: 12.10.2018).
3. Sadovskiy I. D. Primenenie modeli COCOMO II dlja ocenki razrabotki programmnogo obespechenija v Windows proektah. *Ekonomika i biznes: teoriia i praktika* [Application of COCOMO II model for evaluation of software development in Windows projects. Economics and business: theory and practice]. 2016, no. 10, pp. 102–106.
4. Shanchenko N. I. *Ocenka trudoemkosti razrabotki programmnogo produkta: metodicheskie ukazaniya* [Evaluation of the complexity of software development: guidelines]. Ulyanovsk, UIHTU Publ., 2015. 40 p.
5. Sydorov N. A., Batsenko D. V., Vasilenko Yu. M., Shchetin Yu. V., Ivanova L. N. *Metody i sredstva ocenki stoimosti programmnogo obespechenija* [Methods and tools of cost estimation software]. *Problemy systemnoho pidkhotu v ekonomitsi*. 2004, no. 7, pp. 113 – 118.
6. Nahapetians N. *Ekonomyka predpriyatiya: Uchebnyk dlia vuzov* [Enterprise Economics: Textbook for universities]. Moscow, YUNYTY-DANA Publ., 2007. 670 p.
7. Koujen O., Fedurko E. *Osnovy Teorii Ogranichenij* [Fundamentals of the theory of Constraints]. Tallinn, TOC Strategic Solutions Publ., 2012. 331 p.
8. Dettmer H. William. *Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement*. Asq Pr, 1997. 378 p. (Russ. ed.: Detmer W. *Teorija ogranichenij Goldratta: Sistemnyj podhod k nepreryvnomu sovershenstvovaniyu*. Moscow, Alpina Biznes Buks Publ., 2008. 444 p.).
9. Rechkalov V. *Dinamicheskoe upravlenie buferom* [Dynamic buffer management]. Available at: <http://tocpeople.com/2013/10/dinamicheskoe-upravlenie-buferom/> (accessed: 10.10.2018).
10. Pravuk O. *Optimizacija zapasov i assortimenta. Podhod teorii ogranichenij* [Optimization of stocks and assortment. The approach of the theory of constraints]. Available at: <https://uppravuk.net/optimizatsiya-zapasov-i-assortimenta-podhod-teorii-ogranichenij/> (accessed: 10.10.2018).
11. Corbett T. *Throughput Accounting*. North River Press, 1998. 174 p. (Russ. ed.: Corbett T. *Uchjot prohoda: Upravlencheskij uchjot po TOC*. Kiev, Neobkhdno i dostatno Publ., 2009. 240 p.).
12. *NBU, Ofitsiyni kurs dolara na 01 hrudnia 2018* [NBU, the Official dollar exchange rate on December 01, 2018]. Available at: <https://minfin.com.ua/currency/nbu/usd/> (accessed: 01.12.2018).

References (transliterated)

1. Niuton R. *Upravlenie proektami ot A do Ja* [Project Management A to Z]. Moscow, Alpina Biznes Buks Publ., 2007. 180 p.
2. Arkhpenkov S. *Lekcii po upravleniju programmnyimi proektami* [Lectures on the management of software projects]. Available at:

Received 04.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Заруднев Максим Андрійович (Заруднев Максим Андреевич, Zarudniev Maksym Andriiovych) – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1061-1249>; e-mail: zarudnev.maxim@gmail.com

Гужва Віктор Олексійович (Гужва Виктор Алексеевич, Huzhva Viktor Oleksiiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6832-4480>; e-mail: guzhva.v.a@gmail.com

ЗМІСТ

<i>Александрова Т. Е., Костяник И. В.</i> Параметрический синтез стабилизатора космической ступени С5М ракеты-носителя «Циклон-3» на активном участке траектории	3
<i>Мазманишвили А. С., Сидоренко А. Ю.</i> Реверсные функции и распределения вероятностей случайного функционала-свертки от нормального марковского процесса.....	9
<i>Гуцол Т. Д.</i> Влияние на пульсирующий кровоток животных собственных и внешних электромагнитных полей.....	15
<i>Lisetsky T. N.</i> Efficiency research of the three-level model of small-series production planning	19
<i>Мищенко О. О., Воловщиков В. Ю., Шапо В. Ф., Гужва В. О.</i> Інформаційна технологія оцінки ризиків програмних проєктів	26
<i>Lysytskyi V. L., Orlenko D. Y.</i> Models for the formation of it company strategic portfolio of projects	31
<i>Vetrova H. V., Huzhva V. O.</i> Analysis of the Markowitz's and Tobin's models for securities portfolio construction ...	36
<i>Довбиш А. С., Зимовець В. І., Бібик М. В.</i> Оптимізація ієрархічної структури даних інтелектуальної системи функціонального діагностування технічного стану складної машини.....	42
<i>Шелехов І. В., Пилипенко С. О., Столярчук О. О., Романенко Т. А.</i> Інформаційно-екстремальне машинне навчання системи контролю знань	49
<i>Чередніченко О. Ю., Іващенко О. В., Гонтар Ю. М., Ворона Б. М.</i> Інтелектуальний аналіз пропозицій товарів на основі контекстних рекомендацій	57
<i>Лециньський В. О., Лециньська І. О.</i> Застосування активного навчання в ситуації циклічного холодного старту рекомендаційної системи.....	66
<i>Dvukhglavov D. E., Dolgorukov A. V., Shovkoplias S. R.</i> Development of the model of a domain representation in the decision support systems	72
<i>Orlovskyi D. L., Kopp A. M., Kuzmin O. O.</i> Information support for the analysis of skills and abilities of university students.....	77
<i>Zarudniyev M. A., Huzhva V. O.</i> Cost and complexity research of software development to solve the problem of inventory management	82

CONTENT

<i>Aleksandrova T. Ye., Kostianyk I. V.</i> The parametric synthesis of the C5M cosmic stage stabilizer of the Cyclone-3 carrier rocket in the active part of trajectory	3
<i>Mazmanishvili A. S., Sydorenko G. Yu.</i> Reversal functions and probability distribution of the pandom cross-functional from normal markov process.....	9
<i>Hutsol T. D.</i> Influence on pulsing blood of animals by own and external electromagnetic fields.....	15
<i>Lisetsky T. N.</i> Efficiency research of the three-level model of small-series production planning	19
<i>Mishchenko O. O., Volovshchikov V. Y., Shapo V. F., Guzhva V. A.</i> Information technology of software projects risks evaluation.....	26
<i>Lysytskyi V. L., Orlenko D. Y.</i> Models for the formation of it company strategic portfolio of projects	31
<i>Vetrova H. V., Huzhva V. O.</i> Analysis of the Markowitz's and Tobin's Models for securities portfolio construction....	36
<i>Dovysh A. S., Zimovets V. I., Bibyk M. V.</i> Optimization of hierarchical data structure of intelligent system of functional diagnosis of technical condition of complex machines	42
<i>Shelehev I. V., Pylypenko S. O., Stolyarchuk O. O., Romanenko T. A.</i> Information-extreme machine learning of knowledge control system	49
<i>Cherednichenko O. Y., Ivashchenko O. V., Gontar Y. M., Vorona B. M.</i> Data mining of commodity proposals based on context recommendations	57
<i>Leshchynskiy V., Leshchynska I.</i> The use of active learning in a situation of a cyclical cold start of the recommender system.....	66
<i>Dvukhglavov D. E., Dolgorukov A. V., Shovkoplias S. R.</i> Development of the model of a domain representation in the decision support systems	72
<i>Orlovskyi D. L., Kopp A. M., Kuzmin O. O.</i> Information support for the analysis of skills and abilities of university students.....	78
<i>Zarudniyev M. A., Huzhva V. O.</i> Cost and complexity research of software development to solve the problem of inventory management	82

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 44 (1320) 2018

Наукові редактори: Годлевський М. Д., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Куценко О. С., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Безменов М. І., канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Шайда В. П., канд. техн. наук, доцент

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу, управління та інформаційно-аналітичних технологій
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид. № 24-18.

Підп. до друку 22.12.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,0. Облік.-вид. арк. 10,25.
Тираж 100 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вил Кирпичова, 2

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»
Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28