

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**

№ 21 (1297) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 21 (1297) 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. — № 21 (1297) 2018. — 78 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, technoeconomic 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:*

Александрова Т. Є., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Бентаєб Ф., доц., Ліонський університет-2, Франція

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

Дорофєєв Ю. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Керстен В., проф., Гамбурзький технологічний університет, Німеччина

Кононенко І. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

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

Павлов О. А., проф., НТУУ «КПІ», 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:*

Aleksandrova T. E., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Bentayeb F., Associate Professor, University of Lyon-2, France

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

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

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

Dorofieiev Yu. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kersten W., Prof., Hamburg University of Technology, Germany

Kononenko I. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

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

Pavlov O. A., prof., NTUU "KPI", 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 № 6 від 06 липня 2018 р.

*А. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, Д. А. ЧИБИСОВ*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Обсуждаются возможности применения различных математических формулировок для моделирования осесимметрично теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива. Показано, что применение уравнения теплопроводности, записанного относительно температуры, может вносить погрешности, связанные с неопределенностью исходных данных о производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности, которая доступна исключительно в табулированной форме для значений температуры, разделенных достаточно большим шагом. Это обстоятельство является существенным для моделирования осесимметричной теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива, поскольку его теплопроводность существенно зависит от температуры, уменьшаясь в 2,5 раза при изменении температуры от 323 К до 1073 К. Показано, что для изучения осесимметричной теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива наибольший интерес представляет смешанная математическая формулировка задачи теплопроводности относительно полей температуры и вектора теплового потока, поскольку соответствующие дифференциальные уравнения не содержат производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. При этом погрешности, вносимые аппроксимацией значений коэффициента теплопроводности по имеющимся табличным данным, будут ограничены погрешностью аппроксимации значений коэффициента теплопроводности, которая легко контролируется по имеющимся табличным данным о значениях коэффициента теплопроводности. Для решения задачи теплопроводности, сформулированной в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, предлагается использовать метод полу-дискретизации, который сводит рассматриваемую задачу к определению временных зависимостей искомых величин в отдельных точках исследуемой области компактного изделия керамического ядерного топлива. Для этого предлагается конечно-разностными формулами заменять производные только по пространственным координатам, что позволит получить обыкновенные дифференциальные уравнения с начальными условиями для определения узловых значений искомых величин.)

**Ключевые слова:** математическая модель, теплопроводность, теплофизические характеристики, керамическое ядерное топливо, коэффициент теплопроводности, метод полу-дискретизации.

*О. В. ЕФИМОВ, Ю. В. РОМАШОВ, Д. О. ЧИБИСОВ*

### **МОДЕЛЮВАННЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В КОМПАКТНИХ ВИРОБАХ КЕРАМІЧНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Обговорюються можливості щодо застосування різних математичних формулювань для моделювання осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива. Показано, що застосування рівняння теплопровідності, записаного відносно температури, може вносити похибки, пов'язані з невизначеністю вихідних даних про похідну температурної залежності коефіцієнта теплопровідності, яка доступна виключно в табличній формі відповідно окремим значенням температури, розділених досить великим кроком. Ця обставина є істотною для моделювання осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива, оскільки їхня теплопровідність істотно залежить від температури, зменшуючись в 2,5 рази при зміні температури від 323 К до 1073 К. Показано, що для вивчення осесимметричної теплопровідності компактних виробів керамічного ядерного палива найбільший інтерес представляє змішана математична формулювання задачі теплопровідності щодо полів температури і вектора теплового потоку, оскільки відповідні такому формулюванню диференціальні рівняння не містять похідною температурної залежності коефіцієнта теплопровідності. При цьому похибка, що вноситься аппроксимацією значень коефіцієнта теплопровідності за наявними табличними даними, будуть обмежені похибкою аппроксимації значень коефіцієнта теплопровідності, яка легко контролюється за наявними табличними даними про значеннях коефіцієнта теплопровідності. Для вирішення задачі теплопровідності, сформульованої в змішаній формі щодо полів температури і вектора теплового потоку, пропонується використовувати метод напів-дискретизації, який зводить розглянуту задачу до визначення залежностей від часу шуканих величин в окремих точках досліджуваної області компактного виробу керамічного ядерного палива. Для цього пропонується за допомогою використання скінчених різностей замінювати похідні тільки по просторовим координатам, на не по часу, що дозволить отримати звичайні диференціальні рівняння з початковими умовами для визначення вузлових значень шуканих величин.

**Ключові слова:** математична модель, теплопровідність, теплофізичні характеристики, керамічне ядерне паливо, коефіцієнт теплопровідності, метод напів-дискретизації.

*O. V. YEFIMOV, YU. V. ROMASHOV, D. O. CHIBISOV*

### **MODELING OF AXISYMMETRIC HEAT CONDUCTION IN COMPACT PRODUCTS OF CERAMIC NUCLEAR FUEL WITH THE TEMPERATURE DEPENDENCIES OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS**

The possibilities of using of various mathematical formulations for modelling the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel are discussed. It is shown that the application of the heat equation wrote with respect to temperature can introduce errors due to the uncertainty of the initial data on the derivative of the temperature dependence of the thermal conductivity, which is available exclusively in a tabulated form for temperature values separated by a sufficiently large step. This circumstance is essential for modelling the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel, since its thermal conductivity depends significantly on temperature, decreasing by a factor of 2.5 with a temperature change from 323 K to 1073K. It is shown that to study of the axisymmetric heat conduction of compact products of ceramic nuclear fuel, the most interesting is the mixed mathematical formulation of the heat conduction problem with respect to the temperature fields and the heat flux vector, since the corresponding differential equations do not contain the derivative of the temperature dependence of the thermal conductivity. In this case, the approximations of the values the thermal conductivity coefficient from the available tabular data will be limited by the error in approximating the values of the thermal conductivity, which is easily monitored from the available tabular data on the values of the thermal conductivity coefficient. To solve the heat conduction problem, formulated in mixed form with respect to the temperature fields and the heat flux vector, it is proposed to use the semi-discretisation method, which reduces the problem under consideration to determining the time dependences of the unknown quantities at individual points of the investigated region of a compact product of ceramic nuclear fuel. To this end, it is proposed to replace finite-difference

formulas by finite-difference formulas only in terms of spatial coordinates, which will allow us to obtain ordinary differential equations with initial conditions for determining the nodal values of the unknown quantities.

**Keywords:** mathematical model, heat conduction, thermo-physical characteristics, ceramic nuclear fuel, thermal conductivity coefficient, semi-sampling method.

**Введение.** Моделирование теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, которые широко используется в современных ядерных энергетических реакторах, представляет значительный интерес для разработки новых и усовершенствования известных видов керамического ядерного топлива [1–5]. Такой интерес связан со специфическими свойствами, – низкой теплопроводностью и существенной температурной зависимостью теплофизических характеристик, – которые порождают особые закономерности процессов теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, существенно ограничивающие его работоспособность в ядерных энергетических реакторах. Поэтому тема данной работы, в которой рассматривается специфика моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива с учетом температурных зависимостей его теплофизических характеристик, является актуальной.

**Уравнения, начальные и граничные условия теплопроводности.** Исследование температурного состояния компактных изделий керамического ядерного топлива сводится к решению задачи теплопроводности, которая достаточно хорошо разработана в настоящее время [6–8]. Компактные изделия керамического ядерного топлива для ядерных энергетических реакторов выполняют чаще всего в цилиндрической форме, как, например, в твелах ядерных реакторов ВВЭР-1000 (рис. 1), поэтому уравнения задачи осесимметричной нестационарной теплопроводности рассмотрим в цилиндрических координатах [6–9]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q}{\partial r} + \frac{q}{r}\right) + \frac{\Sigma_f}{\gamma} \Phi(r), \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (2)$$

где  $T = T(r, t)$  и  $q = q(r, t)$  – температура и радиальный тепловой поток;

$c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности топлива;

$r$  и  $t$  – радиальная координата и время;

$\Sigma_f$  и  $\gamma$  – макроскопическое сечение деления и величина, обратная энергии, приходящейся на один акт деления;

$\Phi(r)$  – плотность нейтронного потока.

Ненулевая мощность внутренних источников тепла в уравнении (1) учитывает выделение энергии в единице объема топлива вследствие ядерной реакции деления, которое определяется плотностью нейтронного потока; предполагается, что плотность нейтронного потока найдена из физического расчета реактора [9]. Необходимость учитывать мощность внутренних

источников тепла является спецификой моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива, поскольку в большинстве других инженерных приложений уравнений теплопроводности мощность внутренних источников тепла обычно равна нулю.

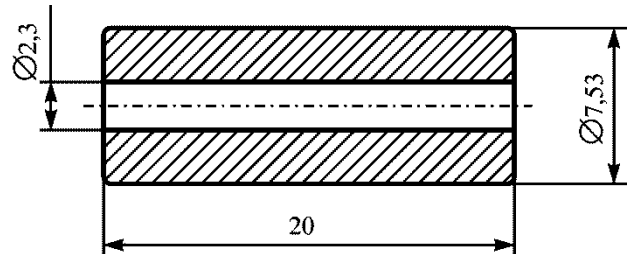


Рис. 1. Сечение и размеры (в мм) топливной таблетки из керамики  $UO_2$  для твэлов ядерного реактора ВВЭР-1000

Уравнения (1), (2) следует рассматривать с учетом начального условия, которое определяет поле температуры в начальный момент времени  $t = t_0$ :

$$T(r, t_0) = T_0(r), \quad (3)$$

где  $T_0(r)$  – заданное поле температуры в начальный момент времени.

Начальное поле температуры  $T_0(r)$  выбирается с учетом целей моделирования. Так, например, начальное поле температуры может отвечать состоянию в нормальных условиях эксплуатации, если необходимо рассмотреть изменение температуры вследствие каких-либо возмущений относительно нормальных условий эксплуатации.

Уравнения (1), (2) следует рассматривать с учетом граничных условий, которые определяют теплообмен на граничных поверхностях изделия. В настоящее время компактные цилиндрические изделия керамического ядерного топлива выполняют с центральным отверстием (рис. 1), поэтому далее рассматриваем граничные условия на внутренней  $r = a$  и наружной  $r = b$  поверхностях, где  $a$  – радиус отверстия и  $b$  – радиус изделия. При моделировании теплопроводности в изделиях керамического ядерного топлива в качестве таких условий приходится рассматривать условия теплообмена:

$$q(a, t) = \alpha_a(T_a - T(a, t)), \quad (4)$$

$$q(b, t) = \alpha_b(T(b, t) - T_b), \quad (5)$$

где  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях  $r = a$  и  $r = b$ ;

$T_a$ , и  $T_b$  – температуры газового наполнителя (обычно – это гелий) в области отверстия и в зазоре между топливом и оболочкой.

Основные трудности моделирования процессов теплопроводности в компактных изделиях керами-

ческого ядерного топлива состоят в том, что величины  $T_a$  и  $T_b$  априори не известны и для их определения совместно с задачей (1)–(5) приходится рассматривать задачу теплопроводности газового наполнителя, а также задачу теплопроводности оболочки твэла с учетом ее теплообмена с движущимся теплоносителем.

**Выбор разрешающих уравнений.** При рассмотрении процессов теплопроводности вместо уравнений (1), (2) традиционно используют одно уравнение теплопроводности относительно температуры, которое можно легко получить, подставив закон Фурье (2) в уравнение баланса теплоты (1). В частном случае, когда теплофизические характеристики материала (теплоемкость, плотность и теплопроводность) характеризуются числовыми константами, уравнение теплопроводности будет линейным, что существенно упрощает решение задач теплопроводности как аналитически, так и численно [6–8]. В то же время, теплофизические характеристики керамического ядерного топлива существенно зависят от температуры, что для значения коэффициента теплопроводности распространенного в настоящее время керамического ядерного топлива  $UO_2$  показано на рис. 2, который построен по данным работы [10]. Для учета таких температурных зависимостей в качестве теплофизических характеристик материала можно использовать средние значения в некотором температурном интервале:

$$\bar{c} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} c(T) dT, \quad (6)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \rho(T) dT, \quad (7)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \lambda(T) dT, \quad (8)$$

где  $\bar{c}$ ,  $\bar{\rho}$  и  $\bar{\lambda}$  – отвечающие интервалу  $[T_0, T_1]$  средние значения теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности;

$c(T)$ ,  $\rho(T)$  и  $\lambda(T)$  – температурные зависимости теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности.

При соответствующем выборе интервала  $[T_0, T_1]$  использование средних значений (3)–(5) в качестве теплофизических характеристик материала не будет вносить заметной погрешности в результаты расчетов при решении уравнений теплопроводности (1), (2), но при этом эти уравнения будут линейными, что существенно упрощает их решение. В качестве границ интервала  $[T_0, T_1]$  следует выбирать минимальную и максимальную температуры в исследуемой области, которые в некоторых случаях можно установить из формулировки задачи теплопроводности, например, в

случае, когда в точках граничных поверхностей  $r = a$  и  $r = b$  заданы температуры. В случае граничных условий вида (4), (5) определение интервала  $[T_0, T_1]$  для вычислений по формулам (3)–(5) оказывается затруднительным, и, поэтому, необходимо учитывать температурные зависимости для теплофизических характеристик и рассматривать нелинейные уравнения теплопроводности (1), (2).

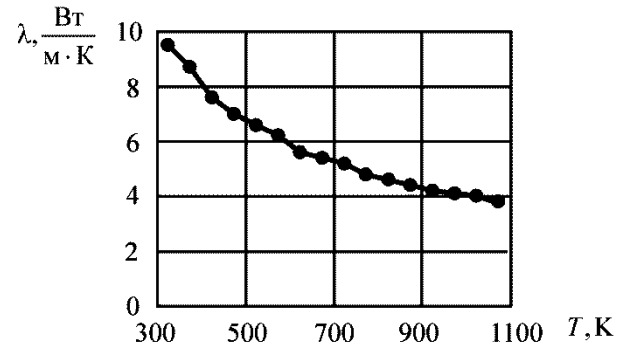


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности керамики  $UO_2$

Традиционное сведение уравнений (1), (2) к одному уравнению теплопроводности относительно температуры приводит к известному нелинейному дифференциальному уравнению [6–8]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \frac{d\lambda}{dT} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{\Sigma_f}{\gamma} \Phi(r), \quad (9)$$

где  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial r^2 + (\partial T / \partial r) / r$  – лапласиан.

Принципиальные трудности при применении уравнения (9) для моделирования теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива состоят в том, что функциональная зависимость  $\lambda(T)$  задана в табличной форме, т.е. известны значения коэффициента теплопроводности, отвечающие отдельным значениям температуры, расположенным с достаточно большим шагом. Так, например, маркеры на рис. 2 отвечают точкам из соответствующих табличных данных, а линия – это ломаная, соединяющая эти точки. С помощью таких табличных данных значения  $\lambda$  для произвольной температуры можно достаточно точно определять, например, путем линейной интерполяции, однако при этом, очевидно, не имеем возможностей точно определять и контролировать погрешность при приближенном определении значения производной  $d\lambda/dT$ , которая входит в уравнение (9). Таким образом, традиционный подход к проблеме теплопроводности, в котором задача сводится к одному дифференциальному уравнению относительно температуры, при моделировании теплопроводности компактных изделий керамического ядерного топлива вследствие специфики исходных данных будет вносить в результаты расчетов неконтролируемую погрешность. В связи с этим следует отметить, что система уравнений (1), (2) не содержит слагаемого с множителем  $d\lambda/dT$ , который затруднительно определять по специфическим исходным данным о

теплопроводности керамического ядерного топлива. Таким образом, вместо традиционного подхода, сводящегося к одному уравнению (9) относительно температуры, для изучения теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива целесообразно использовать систему уравнений теплопроводности (1), (2) относительно температуры и вектора теплового потока.

**Метод численного интегрирования.** Решение нелинейных уравнений теплопроводности (1), (2), в которых учитываются температурные зависимости теплофизических характеристик, представляет значительные трудности и может быть в общем случае решено только при помощи численных методов. В работе [11] для решения линейного уравнения теплопроводности предлагается использовать метод полу-дискретизации с конечными разностями. Идея этого подхода состоит в том, чтобы свести начально-краевую задачу для дифференциальных уравнений (1), (2) к интегрированию дифференциальных уравнений с начальными условиями при помощи хорошо разработанных для этих целей численных методов [12]. Для этого используем конечные разности, которые применяем только для производных по координате  $r$ , что позволяет получить обыкновенные дифференциальные уравнения относительно функций времени для неизвестных задач в узлах сетки. Такой подход обладает преимуществом по сравнению с традиционным методом сеток по координатам и по времени [11]. Основные преимущества связаны с широкими возможностями выбора методов для численного интегрирования по времени, тогда как в классическом методе сеток интегрирование по времени осуществляется по существу при помощи простейшего метода – метода Эйлера. В работе [11] показано, что для решения задач теплопроводности при моделировании температурного состояния компактных изделий керамического ядерного топлива весьма перспективным является метод Мерсона с автоматическим выбором шага интегрирования, который позволяет согласовывать шаг интегрирования по времени с шагом сетки по координате.

**Выводы.** Представленные в работе результаты теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы, которые предоставляют возможности сформулировать практические рекомендации по выполнению моделирования процессов теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива.

Применение уравнения теплопроводности, записанного относительно искомой температуры, может вносить погрешности в результаты расчетов, связанные с неопределенностью исходных данных о производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности, которая для керамического ядерного топлива доступна исключительно в табулированной форме для значений температуры, разделенных достаточно большим шагом. Это обстоятельство является существенным для моделирования процессов осесимметричной теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного

топлива, поскольку теплопроводность материала ядерного топлива существенно зависит от температуры, уменьшаясь в 2,5 раза при изменении температуры от 323 К до 1073К.

Для изучения процессов осесимметричной теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива наибольший интерес представляет математическая формулировка задачи теплопроводности в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, поскольку соответствующие дифференциальные уравнения не содержат производной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. При этом погрешности, вносимые аппроксимацией значения коэффициента теплопроводности по имеющимся табличным данным, будут ограничены погрешностью аппроксимации значений коэффициента теплопроводности, которая легко контролируется по имеющимся табличным данным о значениях коэффициента теплопроводности.

Для решения задачи теплопроводности, формулированной в смешанной форме относительно полей температуры и вектора теплового потока, предлагается использовать метод полу-дискретизации, который сводит рассматриваемую задачу к определению временных зависимостей искомых величин в отдельных точках исследуемой области компактного изделия керамического ядерного топлива. Для этого предлагается конечно-разностными формулами заменять производные только по пространственным координатам, что позволит получить обыкновенные дифференциальные уравнения с начальными условиями для определения узловых значений искомых величин.

#### Список литературы

1. Wang Y., Zhou X., Kou M. Peridynamic investigation on thermal fracturing behavior of ceramic nuclear fuel pellets under power cycles. *Ceramics International*. 2018. Vol. 4, issue 10. P. 11512–11542.
2. Saoudi M., Staicu D., Mouris J., Bergeron A., Hamilton H., Naji M., Freis D., Cologna M. Thermal diffusivity and conductivity of thorium-uranium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 500. P. 381–388.
3. Zhou W., Liu R., Revankar S. T. Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity UO<sub>2</sub>-BeO fuel in light water reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2015. Vol. 81. P. 240–248.
4. Kheradmand Saadi M., Bashiri B. Neutronic and thermal-hydraulic analysis of alternative ceramic fuels in the next-generation of light water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2016. Vol. 87. P. 89–96.
5. Huang H., Spencer B., Hales J. Discrete element method for simulation of early-life thermal fracturing behavior in ceramic nuclear fuel pellets. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 278. P. 515–528.
6. Hahn D. W., Özışık M. N. *Heat Conduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 718 p.
7. Yener Y., Kakac S. *Heat Conduction*. New York – Abingdon: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 455 p.
8. Jiji L. M. *Heat Conduction*. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 431 p.
9. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. *Теплообмен в ядерных энергетических установках* / ред. Б. С. Петухов. Москва: Атомиздат, 1974. 408 с.
10. Чиркин В. С. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник*. Москва: Атомиздат, 1968. 484 с.

11. Ефимов О. В., Ромашов Ю. В., Есипко Т. А., Чибисов Д. А. Численные методы решения задач теплопроводности для изучения температурного состояния керамического ядерного топлива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 13(1289). С. 33–36.
12. Hoffman J. D., Frankel S. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. New York – Basel: Marcel Dekker Inc., 2001. 823 p.
5. Huang H., Spencer B., Hales J. Discrete element method for simulation of early-life thermal fracturing behavior in ceramic nuclear fuel pellets. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 278, pp. 515–528.
6. Hahn D. W., Özişik M. N. *Heat Conduction*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 718 p.
7. Yener Y., Kakac S. *Heat Conduction*. New York – Abingdon: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. 455 p.
8. Jiji L. M. *Heat Conduction*. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 2009. 431 p.
9. Petukhov B. S., Genin L. G., Kovalev S. A. *Теплообмен в ядерных энергетических установках* [Heat transfer in nuclear power plants] / ed. B. S. Petukhov. Moscow: Atomizdat Publ., 1974. 408 p.
10. Chirkin V.S. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник* [Thermophysical properties of nuclear engineering materials: a reference book]. Moscow: Atomizdat Publ., 1968. 484 p.
11. Yefimov A., Romashov Yu., Yesypenko T., Chibisov D. *Numerical methods for heat conductivity problems solving to research the temperature state of ceramic nuclear fuel*. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 13 (1289), pp 33–36.
12. Hoffman J. D., Frankel S. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. New York–Basel, Marcel Dekker Inc., 2001. 823 p.

**References (transliterated)**

1. Wang Y., Zhou X., Kou M. Peridynamic investigation on thermal fracturing behavior of ceramic nuclear fuel pellets under power cycles. *Ceramics International*, 2018, vol. 4, issue 10, pp. 11512–11542.
2. Saoudi M., Staicu D., Mouris J., Bergeron A., Hamilton H., Naji M., Freis D., Cologna M. Thermal diffusivity and conductivity of thorium- uranium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 500, pp. 381–388.
3. Zhou W., Liu R., Revankar S. T. Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity UO<sub>2</sub>–BeO fuel in light water reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 81, pp. 240–248.
4. Kheradmand Saadi M., Bashiri B. Neutronic and thermal-hydraulic analysis of alternative ceramic fuels in the next-generation of light water reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, vol. 87, pp. 89–96.

Поступила (received) 29.05.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Єфімов Олександр Вячеславович (Ефимов Александр Вячеславович, Yefimov Aleksander Viacheslavovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>; e-mail: [avefim@kpi.kharkov.ua](mailto:avefim@kpi.kharkov.ua)

**Ромашов Юрій Володимирович (Ромашов Юрий Владимирович, Romashov Yurii Volodymyrovych)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8376-3510>; e-mail: [yu.v.romashov@gmail.com](mailto:yu.v.romashov@gmail.com)

**Чибісов Дмитро Олексійович (Чибисов Дмитрий Алексеевич, Chibisov Dmytro Oleksiiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри парогенераторобудування; м. Харків, Україна; e-mail: [dimachibisov93@gmail.com](mailto:dimachibisov93@gmail.com)

*E. N. NIKULINA, V. P. SEVERYN, N. V. KOTSIUBA*

### **OPTIMIZATION OF DIRECT QUALITY INDEXES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF STEAM GENERATOR PRODUCTIVITY**

The system of automatic control of the productivity of the PGV-1000 steam generator of the power unit of the nuclear power plant with the WWER-1000 reactor is considered. This control system includes a system for automatically controlling the water level in the steam generator. The error signal, which is fed to the input of the productivity controller, is generated by the signal of the specified speed of the drive turbine, as well as pulses from the thermal power sensor and from the water and vapor pressure sensors. Based on the model of the water level control system in the steam generator, mathematical models of performance control systems have been developed under various control laws. To formulate optimization tasks for performance management systems, vectors from variable parameters of performance controllers are formed, constraints on these parameters are imposed, constraints are created for the areas of system stability, direct indexes of system quality are introduced, and a vector objective function is created that takes into account all imposed restrictions and quality criteria. Computational experiments on optimizing the controllers of productivity control systems were performed on the basis of direct quality indexes of systems by modified methods of step adaptation and Nelder – Mead. Analysis of the results of optimization of performance control systems allows us to conclude that, in comparison with the minimization of integral quadratic estimates, the optimization of direct quality indexes has made it possible to substantially improve the speed of the systems. The greatest value of the control time takes place for the differential controller, and the smallest identical values – for the proportional-integral and proportional-integral-differential regulators. Theoretically, the expediency of using a more simple proportional-integral controller in the steam generator productivity control system is justified. Additional analysis of the state variables in the productivity control system and comparison of transients before and after optimization allows us to conclude that the maximum deviation of the water level in the steam generator has decreased and its oscillations have disappeared. Also, fluctuations in water flow disappeared, the maximum deviation and oscillation of the control error decreased substantially, the overshoot and oscillations of other state variables practically disappeared. Thus, the optimization of the quality indexes of the automatic control system of the steam generator's productivity has made it possible to significantly improve the main processes in it.

**Keywords:** the steam generator of the nuclear power plant, the regulator of steam generator productivity, the automatic control system, the mathematical model, the direct quality indexes, the vector objective function, the optimization method.

*О. М. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, Н. В. КОЦЮБА*

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРЯМИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОДУКТИВНІСТЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА**

Розглянуто систему автоматичного управління продуктивністю парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку атомної електричної станції з реактором ВВЕР-1000. Ця система управління включає систему автоматичного управління рівнем води в парогенераторі. Сигнал помилки, який надходить на вхід регулятора продуктивності, формується сигналом заданої частоти обертання приводної турбіни, а також імпульсами з датчика теплової потужності та з датчиків тиску води і пари. На підставі моделі системи управління рівнем води в парогенераторі розроблені математичні моделі систем управління продуктивністю при різних законах регулювання. Для постановки задач оптимізації систем управління продуктивністю сформовані вектори зі змінних параметрів регуляторів продуктивності, накладені обмеження на ці параметри, сформовані обмеження для областей стійкості систем, введені прямі показники якості систем і сформована векторна цільова функція, яка враховує всі введені обмеження і критерії якості. Проведено обчислювальні експерименти з оптимізації регуляторів систем управління продуктивністю на підставі прямих показників якості систем модифікованими методами адаптації кроку і Нелдера – Міда. Аналіз результатів оптимізації систем управління продуктивністю дозволяє зробити висновок, що в порівнянні з мінімізацією інтегральних квадратичних оцінок оптимізація прямих показників якості дозволила істотно підвищити швидкодію систем. Найбільше значення часу регулювання має місце для диференціального регулятора, а найменші однакові значення – для пропорційно-інтегрального і пропорційно-інтегрально-диференціального регуляторів. Теоретично обґрунтовано доцільність застосування в системі управління продуктивністю парогенератора більш простого пропорційно-інтегрального регулятора. Додатковий аналіз змінних стану в системі управління продуктивністю і порівняння перехідних процесів до і після оптимізації дозволяє зробити висновок, що зменшилося максимальне відхилення рівня води в парогенераторі та зникли його коливання. Також зникли коливання витрати води, істотно знизилася максимальне відхилення і коливання помилки управління, практично зникли перерегулювання і коливання інших змінних стану. Таким чином, оптимізація показників якості системи автоматичного управління продуктивністю парогенератора дозволила істотно поліпшити основні процеси, котрі в ній протікають.

**Ключові слова:** парогенератор атомної електростанції, регулятор продуктивності парогенератора, система автоматичного управління, математична модель, прямі показники якості, векторна цільова функція, метод оптимізації.

*Е. Н. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, Н. В. КОЦЮБА*

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРЯМИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА**

Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора ПГВ-1000 энергоблока атомной электрической станции с реактором ВВЭР-1000. Эта система управления включает систему автоматического управления уровнем воды в парогенераторе. Сигнал ошибки, который поступает на вход регулятора производительности, формируется сигналом заданной частоты вращения приводной турбины, а также импульсами с датчика тепловой мощности и с датчиков давления воды и пара. На основании модели системы управления уровнем воды в парогенераторе разработаны математические модели систем управления производительностью при различных законах регулирования. Для постановки задач оптимизации систем управления производительностью сформированы векторы из переменных параметров регуляторов производительности, наложены ограничения на эти параметры, сформированы ограничения для областей устойчивости систем, введены прямые показатели качества систем и сформирована векторная целевая функция, которая учитывает все введенные ограничения и критерии качества. Проведены вычислительные эксперименты по оптимизации регуляторов систем управления производительностью на основании прямых показателей качества систем модифицированными методами адаптации шага и Нелдера – Миды. Анализ результатов оптимизации систем управления производительностью позволяет заключить, что по сравнению с минимизацией интегральных квадратичных оценок оптимизация прямых показателей качества позволила существенно повысить быстродействие систем. Наибольшее значение времени регулирования имеет место для дифференциального регулятора, а наименьшие одинаковые значения – для



пропорционально-интегрального и пропорционально-интегрально-дифференциального регуляторов. Теоретически обоснована целесообразность применения в системе управления производительностью парогенератора более простого пропорционально-интегрального регулятора. Дополнительный анализ переменных состояния в системе управления производительностью и сравнение переходных процессов до и после оптимизации позволяет заключить, что уменьшилось максимальное отклонение уровня воды в парогенераторе и исчезли его колебания. Также исчезли колебания расхода воды, существенно снизились максимальное отклонение и колебания ошибки управления, практически исчезли перерегулирование и колебания других переменных состояния. Таким образом, оптимизация показателей качества системы автоматического управления производительностью парогенератора позволила существенно улучшить основные протекающие в ней процессы.

**Ключевые слова:** парогенератор атомной электростанции, регулятор производительности парогенератора, система автоматического управления, математическая модель, прямые показатели качества, векторная целевая функция, метод оптимизации.

**Introduction.** Water feeding department of the steam generator (SG) of the power-generating unit of the nuclear power plant equipped with a WWER reactor, is a critical element of heat schedule [1–5]. Its reliable and efficient work provides reliability and efficiency of work of a power-generating unit [2, 3, 6]. The steam generator control is performed by two main automatic control systems (ACS): ACS of the water level in the SG (LACS), and ACS of the feeding department productivity (PACS), including LACS [6]. Synthesis of optimal control schedules of the steam generator PGV-1000, which is included in the composition of WWER-1000 equipped NPP power-generating units, is a non-resolved task relevant with modernization of running power-generating units of the energy system of Ukraine.

The optimal PACS synthesis task for SG PGV-1000 is a task of multi-criteria optimization and includes setting of varying variables, forming of the ACS quality parameters and restriction of varying parameters [7–9]. The varying parameters are the parameters of the ACS regulators, the quality criteria are the direct quality indexes (DQI) of the ACS. The conditions of technical workability of the systems in a form of two-sided inequalities and the ACS stability condition are superimposed on the varying parameters.

**Publications review.** In the present time, a general methodic is developed for ACS many-criteria synthesis of the NPP power-generating unit based on models and techniques of the ACS quality criteria optimization [10]. For the ACS quality criteria optimization, the OPTLAB laboratory is used, including variety of one-dimensional and many-dimensional optimization techniques [10, 11].

The NPP power-generating unit ACS mathematic models are represented in the form of the differential equations systems (DESS). Those systems are stiff and for their solution, the matrix integrating techniques are developed [11].

The controlled value transition process quality is estimated by the quality numerical indexes, direct and indirect. By the DES integrating, a transition process graph is plotted, where the DQI are determined: over-regulation, oscillations factors, regulation time [11]. The indirect quality ACS factors are calculated simpler than DQI, without the DES integrating. They include integral quadric estimates (IQEs), that are expressed by an integral from the regulation mistake function square and gives uniform numerical quality indicator characterizing the over-regulation and damping rate of the transition process in aggregate [10, 11].

During the ACS quality indexes optimization, it is necessary to consider variety of restrictions of varying

parameters, including the technical feasibility restrictions and the ACS stability conditions. For a consistent accounting of all the restrictions, a step-by-step approach is proposed for the IQE and DQI optimization tasks [10, 11]. Such approach realization is based on the optimization of vector objective functions [11].

The mathematic models of the LACS and PACS of the SG are developed [10]. An identifying of the NPP power-generating unit SG PACS parameters is performed by the experimental characteristics [12]. Multi-criteria synthesis of the SG PACS is performed through the minimization of the IQE [10]. The SG PACS synthesis by the DQI isn't described in any of the analyzed sources.

**Research models and techniques.** SG PACS is designed to regulate the feeding water consumption in the steam generator, maintain a balance between the feeding water pressure and pressure of the steam supplied into the turbine. The PACS basic diagram is presented at the Fig. 1. The PACS is three-impulse: error signal fed at the productivity regulator (PR) enter is formed by the signal of the driving turbine rotation frequency master  $\omega_s$  and impulses from the heat capacity gauge  $Q_z$  and from the gauges of water pressure  $P_w$  and steam pressure  $P_s$ . The productivity regulator signal influences the actuating device (PAD) changing the variable  $m_d$  of the steam feeding regulating valve (SFRV) with discharge flow  $G_d$  for the driving turbine. By the rotation frequency change  $\omega$  of the driving turbine, the feeding turbo pump (FTP) productivity changes, where the feeding water with discharge  $G_p$  is applied. From the FTP, the feeding water through tubes passes the high pressure heater (HPH) and is supplied at the feeding valve regulator (FVR). The FVR is driven by the level regulator (LR). The error signal fed at the LR enter, is formed by the level master signal  $H_s$ , level master impulses  $H$  and from the water discharge  $G_w$  and steam discharge  $G_s$  gauges. The feeding regulator signal influences the level actuating device (LAC) changing the  $m_w$  variable of the FVR. The ACS input actions are the heat carrier heat capacity  $Q_t$ , variable  $m_s$  of the turbine regulating valve (TRV), the driving turbine rotation frequency  $\omega_s$ , steam discharge  $G_d$  to the driving turbine and the feeding water discharge  $G_p$ .

Basing on the steam generator level ACS model with PI regulating law, the mathematical models of the SG PACS are developed with various regulating laws, and the model parameters identifying with PI regulators is performed [10, 12]. Let's calculate parameter values of the SG PACS by the steam generator ACS DQI optimization with objective of choice of most efficient productivity regulator of minimal complexity.

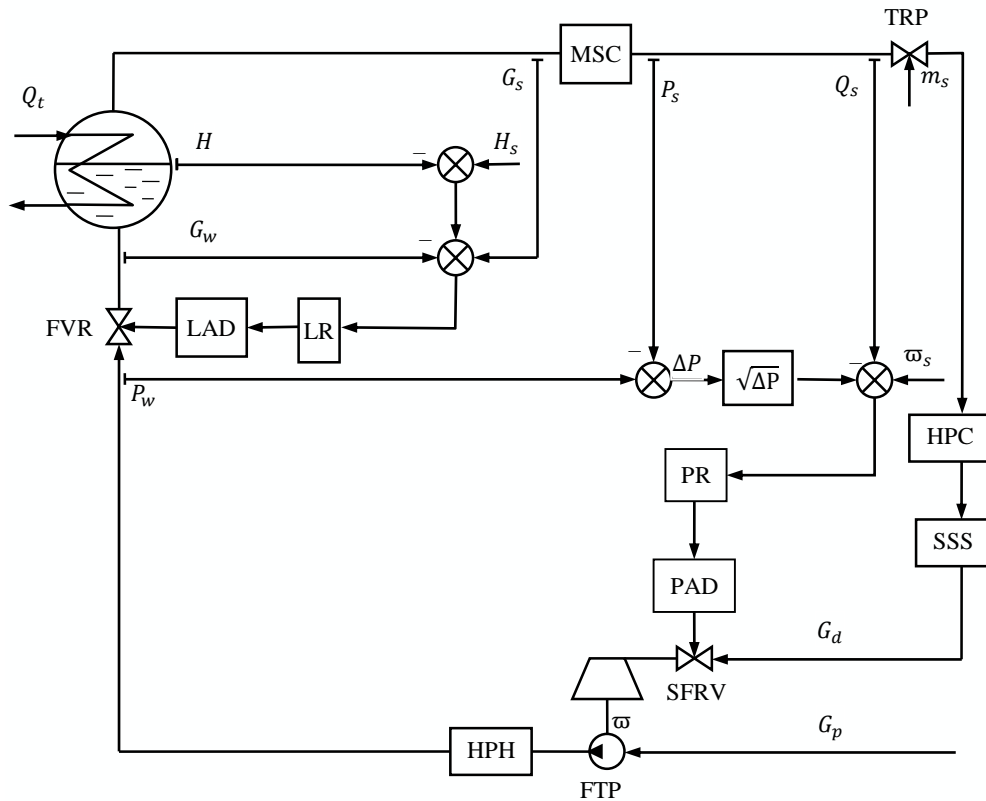


Fig. 1. Steam regulator ACS basic diagram

To set the problem of the PACS parameters optimization, form the vector  $\mathbf{x} \in R^p$  of the PR varying parameters  $K_p$ ,  $\lambda_I$  and  $\lambda_D$ . Depending of the productivity regulator type  $p \in \{1, 2, 3\}$ : for a proportional (P), integral (I) and differential (D) regulators  $p = 1$ , for PI, ID and PID regulators  $p = 2$ , for a PID regulator  $p = 3$ . For a PR parametric synthesis under a disturbing action  $\mathbf{u}_s$  and outgoing variable of the feeding water flow  $g_w$  let's represent a PR PACS model in the form:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_\varphi\boldsymbol{\varphi}_s + \mathbf{B}_q\mathbf{q} + \mathbf{B}_u\mathbf{u}_s, \mathbf{g}_w = \mathbf{C}_g\mathbf{X}. \quad (1)$$

The matrix and model vectors parameters (1) are obtained on the basis of experimental processes and corresponds to the different regulators types [10, 12].

Apply the restrictions on the varying parameters:  $a_i \leq x_i \leq b_i$ ,  $i = \overline{1, p}$ . Using the cut-off operation  $\lfloor y \rfloor = \max\{y, 0\}$  form the penalty function

$$S(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p [\lfloor a_i - x_i \rfloor + \lfloor x_i - b_i \rfloor].$$

To account the PACS stability by its model stage matrix  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$  form the characteristic polynomial  $\alpha(\mathbf{x}, s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i(\mathbf{x})s^{n-i}$  and calculate the Routh table first column factor  $\rho_k(\mathbf{x})$ ,  $k = \overline{0, n}$ . Determine the PACS stability region:

$$\alpha_i(\mathbf{x}) > 0, i = \overline{0, n}, \rho_k(\mathbf{x}) > 0, k = \overline{2, n-1}. \quad (3)$$

The first inequalities group violation stage (3) represent by a penalty function

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n \lfloor -\alpha_i(\mathbf{x}) \rfloor. \quad (4)$$

DQI are the over-regulation  $\sigma(\mathbf{x})$ , oscillations range  $\zeta(\mathbf{x})$ , regulation time  $t_c(\mathbf{x})$  and its relative value  $\tau(\mathbf{x}) = t_c(\mathbf{x})/T_f$ . Regulation time must be minimal under the system stability and the factors restrictions:

$$\sigma(\mathbf{x}) \leq \sigma_m, \zeta(\mathbf{x}) \leq \zeta_m, \tau(\mathbf{x}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

All the inequalities correspond with the restrictions fulfillment regions:

$$G_1 = \{\mathbf{x} | a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, p}\},$$

$$G_2 = \{\mathbf{x} | \alpha_i(\mathbf{x}) > 0, i = \overline{0, n}\},$$

$$G_k = \{\mathbf{x} | \rho_k(\mathbf{x}) > 0\}, k = \overline{3, n},$$

$$G_{n+1} = \{\mathbf{x} | \sigma(\mathbf{x}) \leq \sigma_m\}, G_{n+2} = \{\mathbf{x} | \zeta(\mathbf{x}) \leq \zeta_m\}.$$

Form a system of quasi-allowable regions from them:

$$D_1 = G_1, D_k = D_{k-1} \cap G_k, k = \overline{2, n+2}.$$

Build the non-intersecting regions of the restrictions levels:

$$H_0 = R^p \setminus D_1,$$

$$H_k = D_k \setminus D_{k+1}, k = \overline{1, n+1},$$

$$H_{n+2} = D_{n+2}.$$

Introduce the factors deviations  $\Delta\sigma(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x}) - \sigma_m$ ,  $\Delta\zeta(\mathbf{x}) = \zeta(\mathbf{x}) - \zeta_m$ . Basing on the functions (2)–(5) form the two-dimension multilevel objective function

$$F(x) = \begin{cases} (0; S(x)), & x \in H_0, \\ (1; P(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}, \\ (n; \Delta\sigma(x)), & x \in H_n, \\ (n+1; \Delta\zeta(x)), & x \in H_{n+1}, \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases} \quad (6)$$

This vector function in the form of  $F(x) = (F_1(x); F_2(x))$  considers two-sided restrictions of varying parameters, necessary and sufficient conditions of the ACS steadiness and the demands for its DQI. For the optimization task solution of the SG PACS regulator parameters the function (6) will be optimized considering the priority of its components: the first component  $F_1(x)$  is a level function, with maximizing priority, and the second  $F_2(x)$  – the penalty function – is minimizing [10, 11]. For the function (6) optimization, modify the methods of unconditional minimization by introduction of the "better" operation  $<$  for two values of the function (6)  $U = (U_1, U_2)$  and  $V = (V_1, V_2)$  [10, 11]:

$$U < V = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2, \\ 0, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2. \end{cases} \quad (7)$$

The methods of unconditional optimization, solving the optimization task for multilevel function (6) are modified, where the usual scalar comparison  $<$  is replaced for the "better" operation  $<$  by the formula (7). For the research, the one-dimension search step adaptation method and multi-dimension optimization Nelder – Mead method are chosen [11].

**Calculation experiments of the control systems synthesis methods.** Perform SG PACS analysis with productivity regulators various types by model (1) under disturbing action  $u_s = 1(t)$ . Form function (6), impose two-sided restrictions on varying parameters values:  $a_i \leq x_i \leq b_i$ ,  $a_i = 0$ ,  $b_i = 100$ ,  $i = \overline{1, p}$ . For obtaining of the optimum processes with minimal regulation time, set the DQI restrictions: the maximum deviation value of the water flow variable  $\sigma_m = 1$ , permissible value of the system's variability  $\zeta_m = 0,65$ . DES (1) integrating by matrix method [11] with input parameters values – integration time  $T_{mf} = 500s$ , integration steps quantity  $L = 200$ , process established value  $y_\infty = 1$ , regulation time interval parameter  $\delta_z = 0,05$ , calculate the DQI value, form the function (6) and optimize it by the modified numerical method.

The function (6) optimization graphs for PACS with PI regulator modified by the Nelder – Mead method are represented at the Fig. 2 и 3. The varying parameters are  $x_1 = K_p$  and  $x_2 = \lambda_I$ . All the search points are shown by the thin line, the better points – by thick line, the initial point is marked by a circle, the final – by a rhombus. Fig. 2 reflects the level function  $F_1(x)$  optimization process and permits to conclude that in the final point all the restrictions of the optimization task are fulfilled. Fig. 3 reflects the penalty function  $F_2(x)$  minimization process

and shows that the regulation time minimum point is obtained.

**The control systems synthesis results.** The PACS synthesis results by the function (6) optimization with different varying regulators parameters P, I, D, PI, PD, ID and PID are presented in the table 1, where the PR types are represented, the function  $N_f$  calculations quantity, regulators optimal parameters  $K_p^*$ ,  $\lambda_I^*$ ,  $\lambda_D^*$  and also corresponding function values (6)  $F_1^*$  и  $F_2^*$ , index of oscillation  $\zeta^*$ , regulation time  $t_c^*$ . Those results show that all restrictions of the optimization task of the regulators parameters and DQI restrictions are fulfilled at the optimal points, maximum regulation time values  $t_c^*$  are obtained, which will permit to comparison the regulators efficiency.

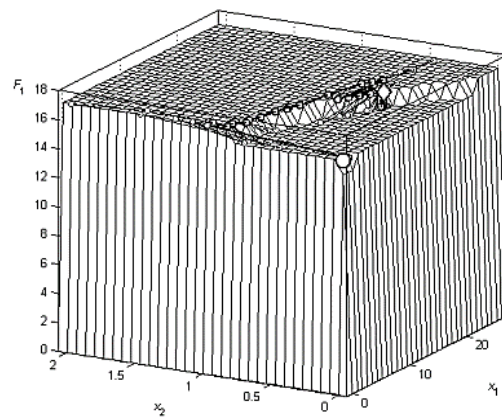


Fig. 2. The level function and the PI regulator parameters optimization trajectory

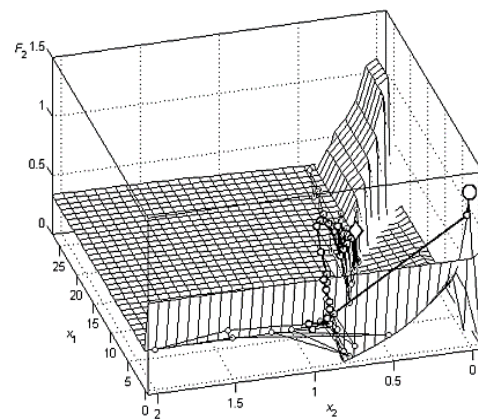


Fig. 3. Penalty function and the PI regulator parameters optimization trajectory

Basing in the table 1 it is necessary to conclude that the regulators PI and PID has maximum speed of operation. For the PI regulator at the Fig. 4 the feeding water flow variable change processes graphs are showed  $y = g_w$  in initial and final search points. Thin line marks the process in the initial point, and thick – at the final point. Near the stationary value  $y_\infty = 1$  the dashed line marks the zone corresponding to the  $\Delta_z = 0,05$ .

Table 1 – DQI SG PACS optimization results

PR	$N_f$	$K_p^*$	$\lambda_f^*, s^{-1}$	$\lambda_D^*, s^{-1}$	$F_1^*$	$F_2^*$	$\zeta^*$	$t_c^*, s$
P	62	61,1431	–	–	16	0,3708	0,54	185
I	62	–	0,8356	–	17	0,3151	0,65	157
D	76	–	–	100	17	1,3071	0,26	653
PI	377	16,0178	0,3741	–	17	0,2635	0,65	131
PD	345	63,6232	–	22,0041	17	0,3691	0,54	185
ID	308	–	0,6714	0,0047	18	0,2788	0,65	140
PID	606	15,6927	0,3886	0,2676	18	0,2625	0,65	131

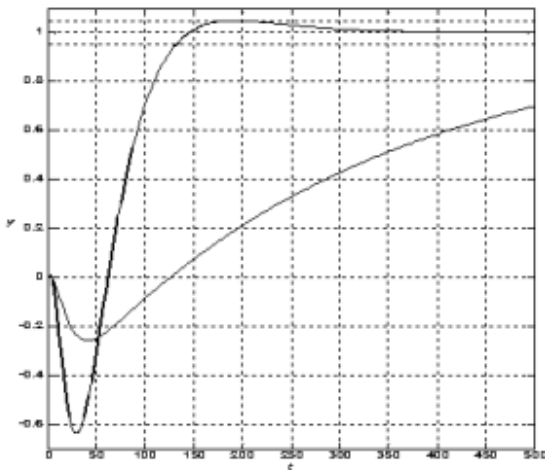


Fig. 4. The feeding water flow change

The function (6) optimization modified methods permit to solve all the synthesis tasks of the optimum SG PACS with various PR types. To optimize PRs with one variable parameter, a modified method is used of step adaptation, and for the PR optimization with several varying parameters – the Nelder – Mead modified method. Authenticity of obtained results of the optimal SG PACS synthesis is confirmed by successful solution of a number of analogous synthesis tasks for another ACS of a NPP power-generating units by different optimization techniques [10, 11].

The optimum SG PACS synthesis results, presented in the table 1, permits to make the following conclusions. Comparing to the IQE minimization, the DQI optimization permits to increase significantly the SG PACS performance speed. The maximum regulation time  $t_c^*$  happens for the D regulator, and the minimal similar values – for PI and PID regulators. The practicability of the PI regulator in the SG PACS is theoretically grounded, because the PI regulator is simpler than PID regulator.

The stage variables change additional analysis in the SG PACS and comparison of the transients before and after the optimization permits to conclude that the maximum deviation of the SG water level variable decreased and its oscillations vanished. Also, the water flow variables oscillations, FTP and HPH pressures vanished, maximum deviation and error oscillations significantly decreased, over-regulation and the FVR and

PAD variables oscillations virtually vanished. Thus, the PACS quality indexes optimization permits significant enhancement of the main regulating processes happening inside it [10]. The considered methodic for the optimum ACS synthesis can be recommended also for synthesis of the other complicated control systems.

**Conclusions.** The PGV-1000 SG of an NPP power-generation unit with a WWER-1000 reactor productivity optimal automatic control systems synthesis task is solved. Basing on the ACS of the SG level, a SG productivity ACS general mathematical model is considered in the state space with relative variables and various regulators, intended for a PACS parametric synthesis. The further development is achieved by the models and methods of parametric synthesis of the SG control systems basing on the ACS models with utilization of optimization methods, which permit to increase quality of the main processes in the productivity control system. The PACS quality indexes system permit to enhance significantly the main control processes emerging inside it. At the first time, basing on comparison of the various PRs inside the SG PACS, the practicability of the PI regulator utilization is theoretically justified. The practical significance of the obtained results lies in the fact that to enhance the quality of the NPP steam generator control processes in normal operation modes, the mathematical models of the automatic control systems in the stages space of the PGV-1000 steam generator productivity. The multi-criteria parametric synthesis of control systems methods based on the modification of the one-dimension and multi-dimension optimization methods are considered. Further research is recommended to perform into the direction of the mathematical models enhancement for the control systems of the steam generator feeding department and optimal systems synthesis. Further research is recommended to perform in the direction.

#### References

1. Иванов В. А. *Регулирование энергоблоков*. Ленинград: Машиностроение, 1982. 311 с.
2. Иванов В. А. *Эксплуатация АЭС: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1994. 384 с.
3. Демченко В. А. *Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС*. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.
4. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. *Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций*. Москва: ИздАТ, 2002. 480 с.

5. Андрушко С. А., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н. и др. *АЭС с реакторами ВВЭР-1000*. Москва: Логос, 2010. 604 с.
6. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сер.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 73. С. 133–138.
7. Ефимов А. В., Гончаренко Л. В., Потанина Т. В. и др. *Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2013. 376 с.
8. Ефимов А. В., Пелипенко Н. Н. *Конструкции, материалы, процессы и расчеты реакторов и парогенераторов АЭС*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2010. 307 с.
9. Ефимов А. В., Каверцев В. Л., Потанина Т. В., Гаркуша Т. А., Есипенко Т. А. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. № 13(1056). С. 92–102.
10. Северин В. П., Никулина Е. Н., Лютенко Д. А., Бобух Е. Ю. Многокритериальный синтез систем управления энергоблока АЭС с использованием лаборатории методов оптимизации OPTLAB. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харьков: НТУ «ХПІ», 2015. № 15(1124). С. 106–111.
11. Домнин И. Ф., Северин В. П., Никулина Е. Н. *Численные методы анализа и синтеза в радиоэлектронике: учеб. пособие по курсу «Основы радиоэлектроники»*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. 164 с.
12. Северин В. П., Никулина Е. Н., Трубочанова Н. В. Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Автоматика та приладобудування. Харьков: НТУ «ХПІ», 2016. № 15 (1187). С. 38–44.
6. Demchenko V. A., Todorcev Yu. K., Lozhechnikov V. F. *Matematicheskaya model' uchastka pitaniya parogeneratora PGV-1000* [Mathematical model of power supply section of steam generator PGV-1000]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: Sistemnyy analiz, upravleniye i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University. Series: System analysis, control and information technology]. Kharkov, KhGPU Publ., 1999, issue 73, pp. 133–138.
7. Efimov A. V., Goncharenko L. V., Potanina T. V. et al. *Sovershenstvovanie i optimizatsiya modeley, processov, konstruktsey i rezhimov raboty energeticheskogo oborudovaniya AES, TES i otopitel'nykh kotel'nykh* [Perfection and optimization of models, processes, designs and operating modes of power equipment of NPP, TPP and heating boilers]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2013. 376 p.
8. Efimov A. V., Pelipenko N. N. *Konstruktsey, materialy, protsessy i raschety reaktorov i parogeneratorov AES* [Constructions, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of NPP]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2010. 307 p.
9. Efimov A. V., Kavertsev V. L., Potanina T. V., Garkusha T. A., Esipenko T. A. *Matematicheskaya model' gorizontalnogo parogeneratora tipa PGV-1000 energobloka AES s VVER* [Mathematical model of a horizontal steam generator of the PGV-1000 type of the power unit of NPP with WWER]. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu "Khakiv's'kyi politekhnichnyi instytut"*. Ser.: *Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustakuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 13(1056), pp. 92–111.
10. Severin V. P., Nikulina E. N., Lutenko D. A., Bobukh Ye. Yu. *Mnogokriterial'nyy sintez sistem upravleniya energobloka AES s ispol'zovaniem laboratorii metodov optimizatsii OPTLAB* [Multicriteria synthesis of control systems of power unit using optimization methods laboratory OPTLAB]. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu "Khakiv's'kyi politekhnichnyi instytut"*. Ser.: *Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustakuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 15(1124), pp. 106–111.
11. Domnin I. F., Severin V. P., Nikulina E. N. *Chislennyye metody analiza i sinteza v radioelektronike: ucheb. posobie po kursu "Fundamentals of Radioelectronics"*. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014. 164 p.
12. Severin V. P., Nikulina E. N., Trubchanova N. V. *Identifikatsiya parametrov sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu parogeneratora energobloka AES* [Identification of parameters of the control system of productivity of steam generator of the nuclear power]. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu "Khakiv's'kyi politekhnichnyi instytut"*. Ser.: *Avtomatika ta prykladobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automation and instrumentation]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 15 (1187), pp. 38–44.

#### References (transliterated)

1. Ivanov V. A. *Regulirovaniye energoblokov* [Regulation of power units]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 311 p.
2. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994. 384 p.
3. Demchenko V. A. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye tekhnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 305 p.
4. Denisov V. P., Dragunov Yu. G. *Reaktornyye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Reactor installations of WWER for nuclear power plants]. Moscow, Izdat., 2002. 480 p.
5. Andrushechko S. A., Vasil'yev B. Yu., Generalov V. N. et al. *AES s reaktorami tipa VVER-1000* [NPPs with WWER-1000 reactors]. Moscow, Logos Publ., 2010. 604 p.

Received 16.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Нікуліна Олена Миколаївна (Никулина Елена Николаевна, Nikulina Elena Nikolaevna)** – канд. техн. наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

**Северин Валерій Петрович (Северин Валерий Петрович, Severyn Valeriy Petrovich)** – д-р техн. наук, професор; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

**Коцюба Ніна Вікторівна (Коцюба Нина Викторовна, Kotsiuba Nina Viktorivna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка кафедри радіоелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

УДК 681.5

*А. С. КУЦЕНКО, В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ***ИНВЕРТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СРЕДЕ  
КВАЗИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Методы обращения динамических систем нашли широкое распространение для решения задач управления механическими и электрическими системами. Инвертирование динамических систем является эффективным способом реализации процессов управления по возмущению, а также в комбинированных системах управления с прогнозирующей моделью. При решении задач обращения возникает ряд трудностей, связанных с высокой чувствительностью результатов по отношению к точности задания параметров математической модели объекта, неустойчивостью при управлении неминимально-фазовыми объектами, нарушении условий физической реализуемости.

В работе предлагается приближенный метод решения задачи обращения линейных стационарных динамических систем во многом свободный от указанных недостатков. Рассматриваются математические модели линейных динамических систем в форме «вход–выход», удовлетворяющие требованиям асимптотической устойчивости, а также условию равенства размерностей векторов входа и выхода. В основе метода лежит представление входных и выходных сигналов их приближениями в линейном пространстве квазигармонических функций времени. Особенностью предложенного метода обращения динамических систем является представление многомерных многочленов в виде произведения прямоугольных матриц на вектор степеней времени. Такое представление позволило свести большинство постановок задач обращения к решению линейных систем матричных алгебраических уравнений.

Компьютерная реализация, предложенного подхода к обращению линейной системы, разработана для «квадратных» линейных скалярных систем в условиях квазигармонических сигналов и содержит блоки аппроксимации задания по выходу, формирования матриц линейных систем и правых частей линейных алгебраических уравнений, оценку числа обусловленности решения линейной системы и блок сравнения результата обращения с заданием на основе непосредственного интегрирования дифференциальных уравнений математической модели.

**Ключевые слова:** динамические системы, математические модели, обращение задачи управления, квазигармонические функции, матричные уравнения, аппроксимация.

*О. С. КУЦЕНКО, В. І. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ***ІНВЕРТУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ КВАЗИГАРМОНІЙНИХ  
СИГНАЛІВ**

Методи обернення динамічних систем знайшли широке розповсюдження для вирішення задач управління механічними і електричними системами. Інвертування динамічних систем є ефективним способом реалізації процесів управління з обуренню, а також в комбінованих системах управління з прогнозуючою моделлю. При вирішенні задач обернення виникає ряд труднощів, пов'язаних з високою чутливістю результатів по відношенню до точності завдання параметрів математичної моделі об'єкта, нестійкістю при управлінні немінимально-фазовими об'єктами, порушенням умов фізичної можливості бути реалізованими.

У роботі пропонується наближений метод розв'язання задачі обернення лінійних стаціонарних динамічних систем багато в чому вільний від зазначених недоліків. Розглядаються математичні моделі лінійних динамічних систем у формі «вхід–вихід», які задовольняють вимогам асимптотичної стійкості, а також умові рівності розмірностей векторів входу і виходу. В основі методу лежить заміна вхідних і вихідних сигналів їх наближеннями в лінійному просторі квазигармонійних функцій часу. Особливістю запропонованого методу обернення динамічних систем є уявлення багатовимірних многочленів у вигляді добутку прямокутних матриць на вектор ступенів часу. Таке уявлення дозволило звести більшість постановок задач обернення до вирішення лінійних систем матричних алгебраїчних рівнянь.

Комп'ютерна реалізація, запропонованого підходу до обернення лінійної системи, розроблена для «квадратних» лінійних скалярних систем в умовах квазигармонійних сигналів і містить блоки апроксимації завдання по виходу, формування матриць лінійних систем і правих частин лінійних алгебраїчних рівнянь, оцінку числа обусловленості рішення лінійної системи і блок порівняння результату обернення із завданням на основі безпосереднього інтегрування диференціальних рівнянь математичної моделі.

**Ключові слова:** динамічні системи, математичні моделі, обернення завдання управління, квазигармонічні функції, матричні рівняння, апроксимація.

*O. S. KUTSENKO, V. I. TOVAZHNYANSKI***INVERSION OF LINEAR DYNAMICAL SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF QUASIHARMONIC  
SIGNALS**

The methods of inversion of dynamical systems are widely used for solving the problems of controlling mechanical and electrical systems. The inverting of dynamic systems is an effective way of implementing processes of control according to disturbance, as well as in combined control systems with a predictive model. In solving the problems of inversion, there are number of difficulties related to the high sensitivity of the results in relation to accuracy of specifying the parameters of a mathematical model of an object, the instability in the control of non-minimal-phase objects, and the violation of physical feasibility conditions.

The paper suggests an approximate method for solving the inversion problem for linear stationary dynamical systems that is largely free of the indicated disadvantages. The method is based on the representation of input and output signals by their approximations in the linear space of quasiharmonic functions of time. Consider mathematical models of linear dynamical systems in the form "input–output". The systems under consideration must satisfy the requirements of asymptotic stability, and also the condition of equality of dimension of the input and output vectors. A feature of the proposed method of inversion of dynamical systems is the representation of multidimensional polynomials, approximating input and output signals, in the form of a product of rectangular matrices and a vector of power of time. Such a representation allowed reducing most of the statements of inversion problems to the solution of linear systems of matrix algebraic equations.

The computer implementation of the proposed approach to the inverting of the linear system is developed for "square" linear scalar systems in conditions of polynomial signal and contains blocks of approximation of the output assignment; the formation of matrices of linear systems and right-hand sides of linear algebraic equations; estimation of the condition number of the solution of the linear system and the block of comparison the result of the inversion with the assignment based on the direct integration of the differential equations of the mathematical model.

**Keywords:** dynamical systems, mathematical model, invers problems, quasiharmonic functions, matrix equations, approximation.

© А. С. Куценко, В. И. Товажнянский, 2018

**Введение.** Проблема обращения динамических систем имеет обширную библиографию и давнюю историю. Основополагающими работами в этом направлении можно считать [1, 2], в которых обоснованы критерии и методы построения обратных операторов. Значительный вклад в развитие теории и практики инверсии динамических систем сделан в работах [3–5]. В них предложены новые критерии обратимости линейных динамических систем и даны конкретные пути решения задачи обращения. Ряд практических результатов решения задач инвертирования применительно к электрическим и механическим системам приведен в работах [6, 7].

Особенное значение проблема обращения приобретает в связи с решением задачи синтеза комбинированных систем автоматического управления. Различные аспекты проблемы обращения для комбинированных систем управления в наиболее общей постановке представлены в [4]. Несмотря на значительный прогресс в решении проблемы инверсии динамических систем на практике имеет место ряд трудностей, связанных с высокой чувствительностью результатов к точности параметров математической модели объекта управления, неустойчивостью при управлении неминимально-фазовыми объектами, нарушению условий физической реализуемости обратных операторов [4, 8, 9]. Перечисленные проблемы не позволяют в общем случае найти практически реализуемое решение задачи нахождения обратного оператора в задаче управления. Тем не менее, для решения ряда практических задач представляется естественным рассмотреть приближенные математические модели объекта управления и сигналов на его входах и выходах, для которых задача обращения имеет корректное решение. В комбинированных системах управления указанные допущения компенсируются контуром управления по отклонению.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка приближенного, практически реализуемого численного метода решения задачи обращения для линейных динамических систем.

**Постановка задачи исследования.** Будем рассматривать линейные стационарные динамические системы, математические модели которых представлены в форме «вход – выход»

$$\sum_{k=0}^p A_k y^{(p-k)} = \sum_{k=0}^q B_k u^{(q-k)}, \quad (1)$$

где  $u \in R^m$  – вектор управления;

$y \in R^s$  – вектор выхода;

$A_0, A_1, \dots, A_p$  – ( $s \times s$ ) матрицы;

$B_0, B_1, \dots, B_q$  – ( $s \times m$ ) матрицы.

В дальнейшем будем предполагать, что рассматриваемая управляемая система асимптотически устойчива, а размерности вектора управления и вектора выхода совпадают т.е. ( $s = m$ ).

Рассмотрим линейное пространство  $\Phi$  непрерывных дифференцируемых функций  $\varphi(t)$ , удовлетворяющих условию

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} \in \Phi. \quad (2)$$

К таким D-функциям можно отнести класс квазигармонических функций вида

$$\varphi(t) = \sum_{k=1}^N R_k(t) \sin \omega_k t + Q_k(t) \cos \omega_k t, \quad (3)$$

где  $\omega_k$  – некоторые постоянные, а  $R_k(t)$  и  $Q_k(t)$  – векторные многочлены степени не более  $l$ . Нетрудно простой проверкой убедиться, что функция  $\varphi(t)$  вида (3) удовлетворяет условию (2).

Докажем следующее утверждение: если входное воздействие  $u(t)$  является D-функцией класса  $\Phi$ , то и вынужденная реакция динамической системы (1) также D-функция класса  $\Phi$ .

Для доказательства утверждения будем искать решение уравнения (1) в виде бесконечного ряда

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k u^{(k)}(t), \quad (4)$$

где  $C_k$  – некоторые  $m \times n$  матрицы, подлежащие определению.

После подстановки (4) в (1) получим

$$\sum_{j=0}^p A_j \sum_{k=0}^{\infty} C_k u^{(k+p-j)} = \sum_{j=0}^q B_j u^{(q-j)}. \quad (5)$$

Приравнивая матричные коэффициенты при производных  $u^{(j)}$  одного порядка в левой и правой частях (5), получим систему матричных уравнений для вычисления матриц  $C_k$ :

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^j A_{p-j+i} C_i = B_{i-j}, & j = \overline{0, p}, \\ \sum_{i=0}^p A_i C_{i+k} = 0, & k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) имеет треугольную структуру относительно искомым матриц  $C_k$  и решается последовательным нахождением матриц  $C_k$  начиная с  $C_0$ .

Таким образом, представление выходной реакции динамической системы (1) при нулевых начальных условиях в виде (4) является корректным, а поскольку все  $u^{(k)}(t)$  принадлежат классу  $\Phi$ , то и их линейное преобразование  $y(t)$  также является элементом  $\Phi$ , т.е. утверждение доказано.

В рамках приведенных допущений относительно структур динамической системы и сигналов на входах и выходах постановка задачи обращения может быть сформулирована следующим образом: найти входное воздействие  $u(t)$  на интервале  $[t_0, t_1]$ , принадлежащее некоторому классу  $\Phi$  D-функций, при котором выход

$y(t)$  системы (1) при нулевых начальных условиях будет заданной D-функцией того же класса  $\Phi$ .

**Решение задачи инвертирования.** Пусть входы и выходы динамической системы (1) принадлежат классу квазигармонических функций (3).

Воспользовавшись матрично-векторным представлением полиномов [10] соотношение (3) можно записать в виде

$$\varphi(t) = \sum_{k=1}^N (R_k \sin \omega_k t + Q_k \cos \omega_k t)T, \quad (7)$$

где  $R_k$  и  $Q_k$  – матрицы, строки которых соответствуют коэффициентам компонент векторных полиномов в (3), а  $T = (1, t, \frac{t^2}{2}, \dots, \frac{t^l}{l!})^T$  –  $(l + 1)$ -мерный вектор-столбец.

Для нахождения производных функции (7) рассмотрим одночастотную функцию вида (7)

$$\varphi(t) = (R \sin \omega t + Q \cos \omega t)T. \quad (8)$$

Последовательность производных функции (8) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= [(R\Lambda - Q\omega) \sin \omega t + (A\omega + B\Lambda \cos \omega t)]T, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= [(R\Lambda^2 - 2Q\Lambda\omega - R\omega^2) \sin \omega t + (Q\Lambda^2 + 2R\Lambda\omega - Q\omega^2) \cos \omega t]T, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d^k\varphi}{dt^k} &= (R^k \sin \omega t + Q^k \cos \omega t)T, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \quad (9)$$

где матрицы  $R_k$  и  $Q_k$  вычисляются по рекуррентным соотношениям

$$\begin{aligned} R^k &= R^{k-1}\Lambda - Q^{k-1}\omega, \\ Q^k &= Q^{k-1}\Lambda + R^{k-1}\omega, \\ R^0 &= R, \quad Q^0 = Q. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрица  $\Lambda$  имеет размерность  $(l + 1) \times (l + 1)$ , а ее элементы находятся в виде

$$\lambda_{ij} = \delta_{i,j+1}, \quad i, j = \overline{1, l+1}.$$

Рекуррентное соотношение (10) можно представить в матричной форме

$$(R^k \ ; \ Q^k) = (R^{k-1} \ ; \ Q^{k-1})\Omega, \quad (11)$$

где  $\Omega - 2(l + 1) \times 2(l + 1)$  – блочная матрица

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Lambda & \omega E \\ -\omega E & \Lambda \end{pmatrix}. \quad (12)$$

На основании соотношений (11) и (12) последовательность матриц полиномиальных коэффициентов производных одночастотной функции (7) можно записать в виде

$$(R^k \ ; \ Q^k) = (R \ ; \ Q)\Omega^k, \quad (13)$$

где матрица  $\Omega^k$  вычисляется последовательным возведением в степень матрицы (12).

Пусть матричное представление входных и выходных сигналов имеет вид

$$\begin{aligned} u(t) &= (R_u \sin \omega t + Q_u \cos \omega t)T, \\ y(t) &= (R_y \sin \omega t + Q_y \cos \omega t)T, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $R_u, Q_u, R_y, Q_y - q \times (l + 1)$ -мерные матрицы коэффициентов полиномиальных множителей.

Тогда производные от этих сигналов в соответствии с (9) можно представить как

$$\begin{aligned} \frac{d^k u}{dt^k} &= (R_u^k \sin \omega t + Q_u^k \cos \omega t)T, \\ \frac{d^k y}{dt^k} &= (R_y^k \sin \omega t + Q_y^k \cos \omega t)T, \end{aligned} \quad (15)$$

где матричные коэффициенты  $R_u^k, Q_u^k, R_y^k, Q_y^k$  находятся в соответствии с формулой (13).

После подстановки (14), (15) и (13) в (1) и сокращения на  $T$  получим

$$\sum_{k=0}^p A_k Y \Omega^{p-k} = \sum_{k=0}^q B_k U \Omega^{q-k}, \quad (16)$$

где  $Y = (R_y \ ; \ Q_y)$  и  $U = (R_u \ ; \ Q_u)$  – матричное представление полиномиальных множителей перед функциями  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$  для выходных и входных сигналов.

Полученное матричное отображение (16) симметрично и позволяет находить решение как прямой, так и обратной задач управления путем векторизации матриц  $Y, U$  и построений на основе кронекеровского произведения матриц [11].

Полученный результат легко распространяется на скалярные системы. В этом случае матрицы  $A_k$  и  $B_k$  представляют собой скаляры  $a_k$  и  $b_k$  соответственно и матричное уравнение (14) приобретет вид

$$Y \sum_{k=0}^p a_k \Omega^{p-k} = U \sum_{k=0}^q b_k \Omega^{q-k}, \quad (17)$$

решение которого относительно векторов  $Y$  или  $U$  (для задачи обращения) сводится к процедуре обращения матриц  $\sum_{k=0}^p a_k \Omega^{p-k}$  или  $\sum_{k=0}^q b_k \Omega^{q-k}$  размерности  $2(l + 1) \times 2(l + 1)$ .

**Программный комплекс для решения задач обращения.** Программное обеспечение в полном объеме разработано применительно к скалярным системам и содержит следующие основные структурные блоки.

1. Блок ввода исходной информации – коэффициентов  $a_0, a_1, \dots, a_p, b_0, b_1, \dots, b_q$ .

2. Блок формирования задания, включающий случайный или с фиксированным шагом выбор  $N$  значений требуемой функции выхода  $y^*(t)$  на



фиксированном временном интервале, а также задание степени  $l$  аппроксимирующих полиномов и частот  $\omega_k$  и вычисление коэффициентов полиномов на основе метода наименьших квадратов. Предусмотрена аппроксимация полиномов кубическими сплайнами.

3. Блок формирования матрицы системы линейных уравнений (17) и вычисление числа обусловленности ( $\text{cond}$ ) систем линейных уравнений на основе евклидовой нормы [12]. Если  $\text{cond} \leq 100$ , то следует решение системы (17). В противном случае степень аппроксимирующих полиномов  $l$  увеличивается на единицу.

4. Правильность решения задачи обращения контролируется путем численного интегрирования исходных систем дифференциальных уравнений при нулевых начальных условиях и сравнения результата интегрирования  $y(t)$  с соответствующими значениями исходной функции выхода  $y^*(t)$ .

**Выводы.** В работе рассмотрены упрощенные математические модели сигналов на основе гармонических функций с полиномиально изменяющейся амплитудой.

Матричное представление полиномиальных амплитуд позволило представить управляемые динамические процессы как статические линейные преобразования в пространстве прямоугольных матриц. Получены достаточно простые и эффективные алгоритмы численного решения задачи инверсии, а также метод оценки степени робастности результатов.

#### Список литературы

1. Sain M. K., Massey J. L. Invertibility of linear time-invariant dynamical systems. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1969. Vol. AS-14., № 2. P. 141–149.
2. Silverman L. M. Inversion of multivariable linear systems. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1969. Vol. AS-14., № 3. P. 270–276.
3. Ильин А. В., Коровин С. К., Фомичев В. В. *Методы робастного обращения динамических систем*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 219 с.
4. Костенко Ю. Т., Любчик Л. М. *Системы управления с динамическими моделями*. Х.: Основа, 1996. 212 с.
5. Борухов В. Т. Критерии обратимости линейных стационарных многомерных систем. *Автоматика и телемеханика*. 1978. Вып. 11. С. 5–11.
6. Пухов Г. Е., Жук К. Д. *Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов*. К.: Наукова думка, 1966. 218 с.
7. Крутько П. Д. *Обратные задачи динамических управляемых систем. Линейные модели*. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Гудвин Г. К., Граббе С. Ф., Сальгадо М. Э. *Проектирование систем управления*. М.: БИНОМ, 2014. 911 с.

9. Trentelman H., Stoorvogel A., Hautus M. *Control Theory for Linear Systems*. Springer, 2001. 389 p. URI: [http://www.math.rug.nl/trentelman/psfiles/book\\_2005.pdf](http://www.math.rug.nl/trentelman/psfiles/book_2005.pdf). (дата обращения: 05.05.2018).
10. Обращение линейных динамических систем в классе полиномиальных сигналов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 28 (1250). С. 19–22.
11. Ланкастер П. *Теория матриц*. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства наука, 1978. 280 с.
12. Форсайт Дж., Моллер К. *Численное решение систем линейных алгебраических уравнений*. М.: Мир, 1969. 167 с.

#### References (transliterated)

1. Sain M. K., Massey J. L. Invertibility of linear time-invariant dynamical systems. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1969. Vol. AS-14., no. 2, pp. 141–149.
2. Silverman L. M. Inversion of multivariable linear systems. *IEEE Trans. Automatic Control*. 1969. Vol. AS-14, no. 3, pp. 270–276.
3. Il'in A. V., Korovin S. K., Fomichev V. V. *Metody robastnogo obrashcheniya dinamicheskikh sistem* [Methods of robust inversion of dynamical systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 219 p.
4. Kostenko Yu. T., Lyubchik L. M. *Sistemy upravleniya s dinamicheskimi modelyami* [Methods of robust inversion of dynamical systems]. Kharkiv, Osнова Publ., 1996. 212 p.
5. Borukhov V. T. *Kriterii obratimosti lineynykh statsionarnykh mnogomernykh sistem* [Criteria for the reversibility of linear stationary multidimensional systems]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], 1978, no.2, pp. 5–11.
6. Puhov G. E., Zhuk K. D. *Sintez mnogovyazyknykh sistem upravleniya po metodu obratnykh operatorov* [Synthesis of multiply connected control systems by the method of inverse operators]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1996. 218 p.
7. Krut'ko P. D. *Obratnyye zadachi dinamicheskikh upravlyayemykh sistem. Lineynyye modeli* [Inverse problems of dynamical control systems. Linear models]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p.
8. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. *Proyektirovaniye sistem upravleniya* [Design of control systems]. Moscow, Binom Publ., 2004. 911 p.
9. Trentelman H., Stoorvogel A., Hautus M. *Control Theory for Linear Systems*. Springer, 2001. 389 p. Available at: [http://www.math.rug.nl/trentelman/psfiles/book\\_2005.pdf](http://www.math.rug.nl/trentelman/psfiles/book_2005.pdf) (accessed 05.05.2018).
10. Kutsenko A. S., Tovazhnyanskiy V. I., Odarchenko N. A. *Obrashcheniye lineynykh dinamicheskikh sistem v klasse polinomial'nykh signalov* [Inversion of linear dynamical systems in the polynomial signals class]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPІ»*. Serija: Systemnyj analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii' [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017. № 28 (1250), pp. 19–22.
11. Lankaster P. *Teoriya matrits* [Matrix Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 280 p.
12. Forsayt D., Moller K. *Chislennoye resheniye sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy*. [Computer solution of linear algebraic systems]. Moscow, Mir Publ., 1969. 167 p.

Поступила (received) 12.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Куценко Олександр Сергійович (Куценко Александр Сергеевич, Kutsenko Oleksandr Sergijovych)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3694>; e-mail: [kuzenko@i.ua](mailto:kuzenko@i.ua)

**Товажнянський Володимир Ігорович (Товажнянский Владимир Игоревич, Tovazhnyanskiy Vladimir Igorevych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0713-3514>; e-mail: [vtovazhnianskiyi@gmail.com](mailto:vtovazhnianskiyi@gmail.com)

*А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК*

### УПРАВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ ПОЛЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ

Представлены результаты исследования по формированию поперечных размеров электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне напряжений 25..90 кВ. Проведены исследования процессов формирования электронных пучков в источниках электронов с холодными металлическими катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Принцип работы таких пушек основан на обратной бомбардировке катода электронами, возвращаемыми магнитным полем, образовании электронного облака вблизи катода и формировании пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях. Их основным отличием от термоэмиссионных пушек является большая плотность тока с единицы поперечной площади катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> и большой срок службы. Поэтому поиск и исследование источников электронов с большим сроком службы является актуальной задачей. На базе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов, в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней и внутренней цилиндрической поверхности с помощью радиального электронного пучка. В работе представлены опытные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию и управлению распределению электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при движении в соленоидальном магнитном поле. Исследована зависимость формирования радиальных размеров электронного пучка от амплитуды и градиента соленоидального магнитного поля в пушке, который нарастает или спадает в канале транспортировки пучка. Приводятся результаты численного моделирования по движению трубчатого электронного потока в магнитном поле соленоида. На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации управляющего магнитного поля. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом. Изучена возможность управления поперечными размерами пучка.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, математическое моделирование, дифференциальное уравнение движения, соленоидальное магнитное поле, управление поперечными размерами пучка.

*О. С. МАЗМАНИШВИЛИ, М. Г. РЕШЕТНЯК*

### УПРАВЛІННЯ ПОПЕРЕЧНИМИ РОЗМІРАМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СОЛЕНІДАЛЬНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ

Представлено результати дослідження щодо формування поперечних розмірів електронного пучка магнітної гарматою з вторинноемісійним катодом в діапазоні напруги 25..90 кВ. Проведено дослідження процесів формування електронних пучків в джерелах електронів з холодними металевими катодами, що працюють в режимі вторинної емісії. Як джерело електронів використовується магнетронна гармата. Принцип роботи таких гармат заснований на зворотному бомбардуванню катода електронами, що повертаються магнітним полем, створенні електронної хмари поблизу катода і формуванні пучка в скрещених електричному і магнітному полях. Їх основною відмінністю від термоемісійних гармат є велика щільність струму з одиниці поперечної площі катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> і великий термін служби. Тому пошук і дослідження джерел електронів з великим терміном служби є актуальним завданням. На базі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом створений прискорювач електронів, в якому використовується осювий електронний пучок для опромінення металевих мішеней і внутрішньої циліндричної поверхні за допомогою радіального електронного пучка. В роботі представлені експериментальні дані і результати, що моделюють розрахунки по формуванню і управлінню розподілу електронного пучка магнетронної гарматою з вторинноемісійним катодом при русі в соленоідальному магнітному полі. Досліджено залежність формування радіальних розмірів вторинноемісійного пучка від амплітуди та градієнта соленоідального магнітного поля в гарматі, який наростає або спадає в каналі транспортування пучка. Наводяться результати чисельного моделювання по руху трубчастого електронного потоку в магнітному полі соленоида. На основі моделі руху електронного потоку розглянуті характеристики результирующего електронного пучка. Показана можливість регулювання діаметра пучка шляхом варіації керуючого магнітного поля. Приведено результати чисельного моделювання за рухом трубчатого електронного потоку в магнітному полі соленоида. Досліджена можливість управління поперечними розмірами пучка.

**Ключові слова:** електронний пучок, магнетрон гармата, математичне моделювання, диференціальне рівняння руху, соленоідальне магнітне поле, управління поперечних розмірів пучок..

*O. S. MAZMANISHVILI, N. G. RESHETNEAK*

### CONTROLLING THE TRANSVERSE DIMENSIONS OF THE ELECTRON BEAM IN THE SOLENOIDAL FIELD OF A MAGNETRON GUN

The results of the study on the formation of transverse dimensions of an electron beam by a magnetron gun with a secondary emission cathode in the voltage range of 25..90 kV are presented. Investigations of the formation of electron beams in electron sources with cold metal cathodes operating in the secondary emission regime are carried out. The electron source is a magnetron gun. The principle of operation of such guns is based on the reverse bombardment of the cathode by electrons returned by the magnetic field, the formation of an electron cloud near the cathode and the formation of a beam in crossed electric and magnetic fields. Their main difference from thermionic guns is the large current density from a unit of the cathode's cross-sectional area  $\sim 50$  A/cm<sup>2</sup> and a long service life. Therefore, the search and investigation of electron sources with a long service life is an urgent task. On the basis of a magnetron gun with a secondary-emission cathode, an electron accelerator is created in which an axial electron beam is used to irradiate metal targets and the inner cylindrical surface with a radial electron beam. The article presents the experimental data and the results of modeling calculations on the formation and control of the electron beam distribution by a magnetron gun with a secondary-emission cathode in motion in a solenoidal magnetic field. The dependence of the formation of the radial dimensions of the electron beam on the amplitude and gradient of the solenoidal magnetic field in the gun, which grows or falls in the channel of the beam transport, is studied. The results of numerical simulation of the motion of a tubular electron beam in a magnetic field of a solenoid are presented. Based on the motion model of the electron beam, the characteristics of the resultant electron beam are considered. It is shown that the diameter of the beam can be adjusted by varying the control magnetic field. The results of numerical modeling on the motion of a tubular electron flux in a magnetic field of a solenoid are given. The possibility of controlling the transverse dimensions of the beam is studied.

**Keywords:** electron beam, magnetron gun, mathematical modeling, differential equation of motion, solenoidal magnetic field, control of transverse beam dimensions.

**Введение.** Электронные пучки различной конфигурации и интенсивности [1-3] применяются в высоковольтной импульсной СВЧ электронике, электронно-лучевых технологиях, ускорительной технике и т.д. [4-6]. В НИЦ «ХФТИ» проводятся исследования процессов формирования электронных пучков в источниках электронов с холодными металлическими катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии. В качестве источника электронов используется магнетронная пушка. Принцип работы таких пушек основан на обратной бомбардировке катода электронами, возвращаемыми магнитным полем, образовании электронного облака вблизи катода и формировании пучка в скрещенных электрическом и магнитном полях. Их основным отличием от термоэмиссионных пушек является большая плотность тока с единицы поперечной площади катода  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> и большой срок службы. Поэтому поиск и исследование источников электронов с большим сроком службы является актуальной задачей. На базе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом создан ускоритель электронов, в котором используется осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней и внутренней цилиндрической поверхности с помощью радиального электронного пучка [7–10].

В настоящей работе изучена возможность управления поперечными размерами электронного пучка с помощью соленоидального поля магнетронной пушки.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** На ускорителе электронов на основе магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом проведены исследования динамики электронного пучка и измерению его параметров при движении частиц в канале транспортировки.

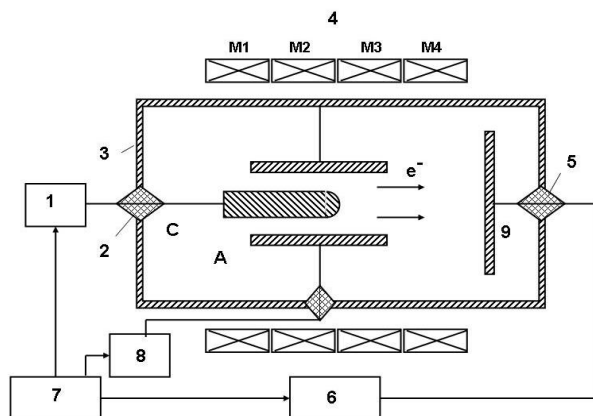


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

1 – высоковольтный импульсный генератор, 2, 5 – изоляторы, 3 – вакуумная камера, 4 – соленоид, M1÷M4 – катушки соленоида, 6 – измерительная система, 7 – блок синхронизации, 8 – генератор запускающего импульса, 9 – мишень, С – катод, А – анод

Блок-схема установки приведена на рис. 1. Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор (1) с амплитудой плоской части импульса 20...100 кВ, длительностью 50...10 мкс и частотой следования 3...10 Гц, который подается на катод пушки. В схеме генератора использовался пол-

ный разряд накопительной емкости на трансформатор через тиратрон. Запуск вторичноэмиссионного разномножения в пушке осуществляется импульсом напряжения с крутым спадом, подаваемым на анод пушки, который создавался генератором (8) с амплитудой напряжения до 15 кВ. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещается в вакуумном объеме (3). Для получения электронного пучка использовались магнетронная пушка с диаметром анода 78 мм и диаметром катода 36 мм. Магнитное поле для генерации и транспортировки электронного пучка создается соленоидом (4), состоящим из 4 секций (катушек), питание которых происходило от источников постоянного тока. Регулируя ток в катушках, можно было изменять амплитуду и продольное распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, что позволяло получать различные режимы формирования электронного пучка. Мишень располагалась на различных расстояниях от среза анода ( $1,5 \div 13,5$  см) и также служила для измерения тока пучка в осевом направлении. Обработка результатов измерений токов пучка и импульса напряжения производилось с помощью измерительной системы (6). Погрешность измерения составляет 1...2%. Поперечные размеры пучка измеряли путем получения отпечатка на металлических мишенях.

Для выполнения моделирующих расчетов построено программа, позволяющая рассчитать траектории движения электронов в заданном магнитном поле [11]. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения, где  $s=ct$  ( $c$  – скорость света,  $t$  – текущее время), и ларморовским параметром задачи  $\mu$ . Таким образом, при выполнении условия  $\mu\Delta s \ll 1$  можно ожидать сходимость численного решения системы к его аналитическому аналогу. Условие  $\mu\Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. С вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача Коши [12]. Результатом будет являться траектория электрона, отвечающая начальным условиям. Потребовав выполнения заданного условия (прохождение канала транспортировки пучка) можно, зафиксировав значения всех компонент траектории электрона, сформировать результирующий пучок и изучить его свойства.

**Результаты эксперимента и численного моделирования и их обсуждение.** Проведенные исследования по формированию электронного пучка и измерению его параметров от напряжения на катоде в диапазоне 20...90 кВ.

На рис. 2 приведена фотография двух отпечатков потока электронов при его попадании на алюминиевую мишень, расположенную на расстоянии 7 см от среза анода.

Отпечатки получены для полей  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ . При этом конфигурация поля  $H_{\max}$  характеризуется положительным градиентом, а конфигурация поля  $H_{\min}$  – отрицательным за срезом анода (см. рис. 3).

В проведенных исследованиях для обоих распределений магнитного поля  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  получена достаточно хорошая однородность азимутального распределения тока электронного пучка. Это было

подтверждено результатами экспериментов, выполненных с использованием 8-секционного цилиндра Фарадея, который размещался в месте расположения мишени.



Рис. 2. Отпечатки электронного пучка на алюминиевой мишени. 1 – нарастающее магнитное поле  $H_{\max}$ , 2 – спадающее магнитное поле  $H_{\min}$

Численное моделирование осуществлялось для обеих полей  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ , а также для набора промежуточных полей, которые с помощью параметра управления  $K$  задавались по формуле

$$H_K = H_{\min} + K(H_{\max} - H_{\min})/10, \quad (3)$$

что позволило промоделировать тенденции в динамике радиальных размеров пучка (см. рис. 4).

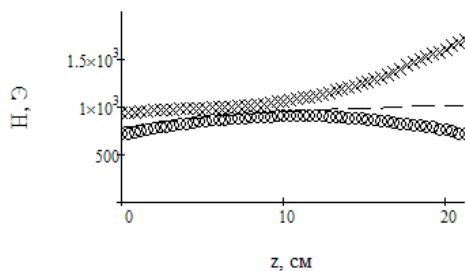


Рис. 3. Примеры конфигураций магнитного поля. Крестики – поле  $H_{\max}$  с положительным градиентом, кружочки – поле  $H_{\min}$  с отрицательным градиентом, пунктир – промежуточный случай  $H_0$

Выполнены измерения размеров электронного пучка на мишени. При напряжении на катоде 55 кВ и спадающем магнитном поле в области транспортировки пучка (рис. 3), кривая  $H_{\min}$  магнетронная пушка формирует в области мишени кольцевой электронный пучок с током 30 А и наружным диаметром 53 мм с толщиной стенки 3 мм. При нарастающем магнитном поле (рис. 3, кривая  $H_{\max}$ ) ток пучка уменьшался до 24 А, при этом наружный диаметр пучка уменьшился до 29,5 см с толщиной стенки 1,8 мм.

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования движения электронов (объем выборки  $N=500$ ) в двух магнитных полях  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$ . Из рис. 5 можно видеть динамику формирования распределений электронного пучка при его распространении вдоль оси  $z$  в канале транспортировки. Из рис. 5 сле-

дует, что электронный пучок по мере движения испытывает уменьшение своих радиальных размеров, что особенно хорошо выражено в случае поля  $H_{\max}$  с положительным градиентом.

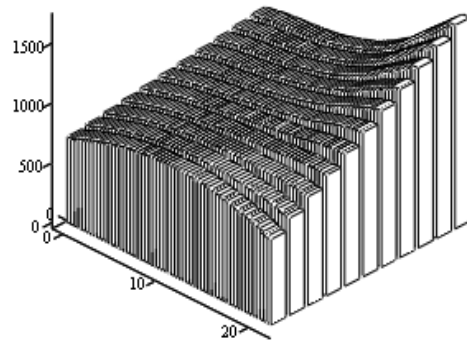


Рис. 4. Набор моделирующих распределений магнитных полей на интервале 20 см

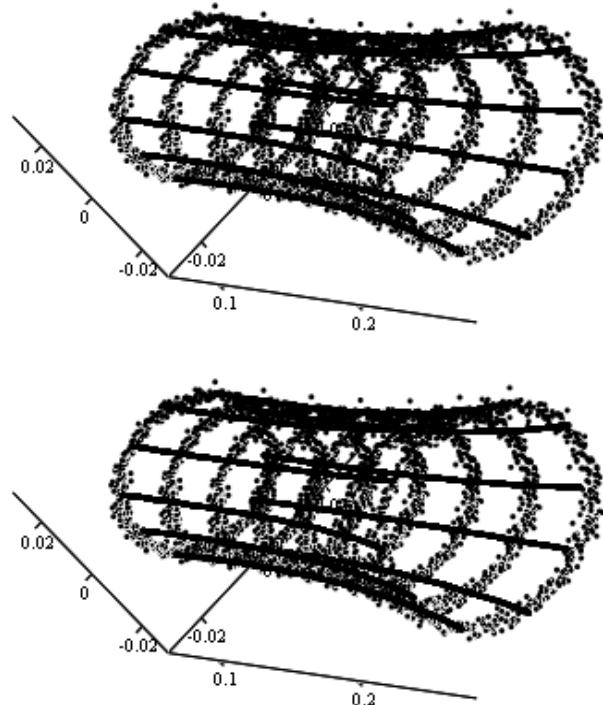


Рис. 5. Эскизы формирования распределения пучка при его движении вдоль оси магнитной системы. Сверху: поле  $H_{\min}$  с отрицательным градиентом, снизу: поле  $H_{\max}$  с положительным градиентом

На рис. 6 показана рассчитанная зависимость среднего радиального размера пучка  $R_{sr}$  от параметра управления  $K$  конфигурации магнитного поля. Из рисунка следует, что средний радиальный размер пучка  $R_{sr}$  достигает своего минимума  $MinR$  тем эффективнее, чем большим является градиент магнитного поля. Локализация точки достижения минимума с ростом  $K$  смещается вдоль оси  $z$  транспортировки системы.

На рис. 7 приведена полученная при моделировании зависимость минимального радиуса  $MinR$  от параметра управления  $K$  конфигурации магнитного

поля. Сопоставление радиусов отпечатков пучка на пролетном расстоянии  $z = 22,5$  см для нарастающего магнитного поля  $H_{\max}$  и спадающего магнитного поля  $H_{\min}$ , показанных на рис. 2, с зависимостями для среднего радиуса  $R_{sr}$  кольцевого электронного пучка, приведенными на рис. 6, дает возможность заключить о достаточно хорошем соответствии найденных значений.

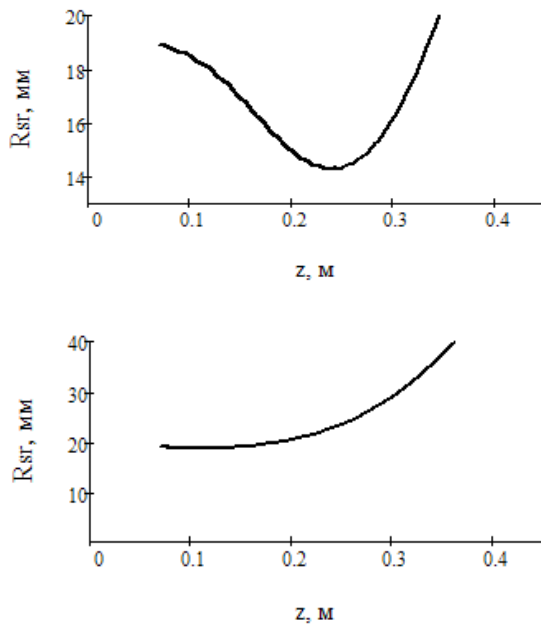


Рис. 6. Зависимость минимума среднего радиуса пучка  $R_{sr}$  от продольной длины  $z$ .  
Сверху – поле  $H_{\max}$ , снизу –  $H_{\min}$

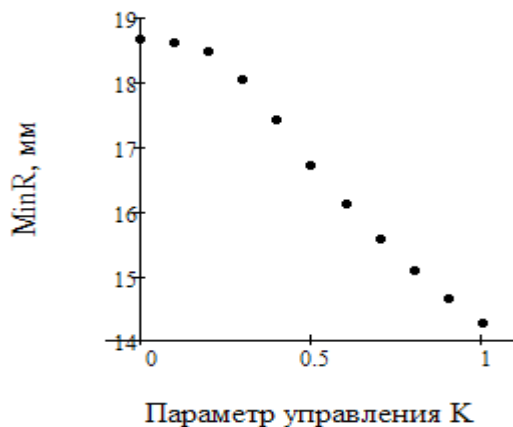


Рис. 7. Зависимость минимального радиуса  $MinR$  от параметра управления  $K$

Таким образом, увеличение градиента полного магнитного поля приводит к перестройке распределения электронов в конфигурационном пространстве, в частности, к сжатию распределения частиц в радиальном направлении.

Путем увеличения градиента магнитного поля можно регулировать плотность частиц в радиальном направлении вдоль длины трубы.

Результаты экспериментальных исследований

свидетельствуют о возможности устойчивого формирования электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с холодным вторичноэмиссионным катодом в магнитном поле соленоида.

**Выводы.** В работе представлены опытные данные и результаты моделирующих расчетов по формированию и управлению распределению электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом при движении в соленоидальном магнитном поле. В исследованиях показана возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в магнитном поле с положительным градиентом.

На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Для различных конфигураций магнитного поля приводятся результаты моделирования по движению трубчатого электронного потока. Показана возможность регулировки диаметра пучка путем вариации управляющего магнитного поля. Полученные численные зависимости согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом.

#### Список литературы

1. Пирс Дж. Р. *Теория и расчет электронных потоков*. Москва: Сов. радио, 1956. 254 с.
2. Алямовский И. В. *Электронные пучки и электронные пушки*. Москва: Сов. радио, 1966. 454 с.
3. Игнатенко В. П. Принципы формирования и фокусировки интенсивных пучков заряженных частиц. *Успехи физических наук*. 1961. Т. 73, № 2. С. 243–275.
4. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proceedings of the 10th international conference on applied charged particle accelerations in medicine and industry*. St.-Petersburg, 2001, pp. 412–417.
5. Garkusha O. V., Maslennikov S. P., Novozhilov A. E., Shkol'nikov E. Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proceedings of the XI international meeting on the use charged particle accelerators in industry and medicine*. St.-Petersburg, Russia, 2005, pp. 126–128.
6. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
7. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of scientific instruments*. 1999, vol. 70, no. 12, pp. 4502–4514.
8. Волколупов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом. *Журнал теоретической физики*. 2001. Т. 71, вып. 7. С. 88–91.
9. Довбня А. Н., Решетняк Н. Г. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником. *Вісник «ХНУ». Сер.: «Ядра, частинки, поля»*. Харків, 2006. № 732, 2(30). С. 96–100.
10. Довбня А. Н., Закутин В. В., Лавриненко С. Д. Модификация поверхности циркония и сплава  $Zr\ 1\%Nb$  электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки. *ВАНТ. Серія «Фізика радіаційного матеріалознавства»*. 2011. № 2(72), вып. 97. С. 39–45.
11. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
12. Хемминг Р. В. *Численные методы*. Москва: Наука, 1972. 303 с.

## References (transliterated)

1. Pirs Jh. P. *Teoriya i raschet elektronnykh potokov* [Theory and calculation of electron currents]. Moscow, Sov. Radio, 1956. 254 p.
2. Alyamovskiy S. V. Elektronnye puchki i elektronnye pushki [Electron beams and electron guns]. Moscow, Sov. radio Publ., 1966. 454 p.
3. Ignatenko V. P. Princyipy formirovaniya i fokusirovki intensivnykh puchkov zaryazhennykh chastits [The principles of formation and focusing of intense beams of charged particles]. *Uspekhi Phisicheskikh Nauk* [The success of physical science]. 1961, vol. 73, no. 2, pp. 243–275.
4. Engelko V., Mueller G., Andreev A. et. Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment. *Proceedings of the 10th international conference on applied charged particle accelerations in medicine and industry*. St.-Petersburg, 2001, pp. 412–417.
5. Garkusha O. V., Maslennikov S. P., Novozhilov A. E., Shkol'nikov E. Ya. A high-current accelerator of microsecond electrons for radiation-technological purposes. *Proc. of the XI international meeting on the use of charged particle accelerators in industry and medicine*. St.-Petersburg, Russia, 2005, pp. 126–128.
6. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
7. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of Scientific Instruments*. 1999, vol. 70, no 12, pp. 4502–4514.
8. Volkolupov Yu. Ya., Dovbnya A. N., Zakutin V. V. Generaciya elektronnykh puchkov v magnetronnom diode s metallicheskim vtorichniemissionnyim katodom [Generation of electron beams in a magnetron diode with a metallic secondary-emission cathode]. *Zhurnal teoreticheskoy fiziki* [Journal theoretical physic]. 2001, vol. 71, no. 7, pp. 88–91.
9. Dovbnya A. N., Reshetnyak N. G. Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichnoemissionnyim istochnikom [Investigation of beam formation in an electron accelerator with a secondary emission source]. *Visnyk "KhNU"* [Bulletin of the Kharkiv National University] Ser.: "Yadra, chastyinki, polya" [Kernels, particles, fields]. Kharkiv, 2006, no 732, 2(30). pp. 96–100.
10. Dovbnya A. N., Zakutin V. V., Lavrinenko S. D. Modifikaciya poverkhnosti zirkoniya i splava Zr 1%Nb elektronnyim puchkom uskoritelya na osnove magnitronnoy pushki [Modification of the surface of zirconium and alloy Zr 1% Nb electron beam of a magnetron gun accelerator]. *VANT. Ser.: "Physika radiatsionnogo materialavedeniya"* [Physics of Radiation Materials Science]. 2011, no. 2(72), issue 97, pp. 39–45.
11. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
12. Hemming R. V. *Chyslennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 303 p.

Поступила (received) 05.06.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мазманішвілі Олександр Сергійович (Mazmanishvili Aleksandr Sergeevich, 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](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Решетняк Микола Григорійович (Reshetnyak Nikolay Grigoriyevich, Reshetneak Nikolay Grigoriyevych)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)

**А. А. НИКУЛЬЧЕНКО**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО СПРОСА НА СЕЗОННЫЕ ТОВАРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРА КРИВОЙ ПРОДАЖ

Предложен метод прогнозирования спроса на сезонные товары с использованием вектора распределения объемов продаж в течение года или вектора кривой продаж, компонентами которого являются объемы недельных продаж рассматриваемого либо аналогичного товара, полученные на основе статистики продаж за предыдущий календарный год. Условием применимости предложенного метода является выполнение гипотезы о сходимости соответствующих недельных объемов продаж двух последовательно идущих лет и гипотезы о существовании групп товаров со схожей динамикой продаж. Применение метода позволяет построить прогноз спроса на товар в течение следующей недели на основе данных об объемах продаж за предыдущие несколько недель текущего и предыдущего годов, а также данных об объемах продаж за интересующую неделю предыдущего года. Представлены особенности программной реализации предложенного метода прогнозирования спроса с использованием микро-сервисной архитектуры на основе платформы Google Cloud Platform, с использованием таких компонентов как Google Kubernetes Engine, Google BigQuery, Redis. Для снижения вычислительной нагрузки на основную систему выполняется копирование необходимых данных для анализа в OLAP-систему и построение требуемого прогноза без использования OLTP-системы. Приведены результаты численного эксперимента по прогнозированию спроса на товар, полученные на основе реальных данных. Выполнено сравнение результатов прогнозирования спроса, полученных с использованием вектора кривой продаж и метода скользящего среднего. Показана возможность использования данного метода прогнозирования спроса в качестве компоненты системы автоматизированного управления запасами в сетях поставок.

**Ключевые слова:** товарный запас, управление запасами, прогнозирование спроса, вектор кривой продаж, сезонный товар, микро-сервисная архитектура.

**А. О. НИКУЛЬЧЕНКО**

## ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВЧОГО ПОПИТУ НА СЕЗОННІ ТОВАРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРА КРИВОЇ ПРОДАЖІВ

Запропоновано метод прогнозування попиту на сезонні товари з використанням вектора розподілу обсягів продажів протягом року або вектора кривої продажів, компонентами якого є обсяги тижневих продажів розглянутого або аналогічного товару, отримані на основі статистики продажів за попередній календарний рік. Умовою застосування запропонованого методу є виконання гіпотези про збіжність відповідних тижневих обсягів продажів двох років, які йдуть послідовно, і гіпотези про існування груп товарів зі схожою динамікою продажів. Застосування методу дозволяє побудувати прогноз попиту на товар протягом наступного тижня на основі даних про обсяги продажів за попередні кілька тижнів поточного і попереднього років, а також даних про обсяги продажів за тиждень, який цікавить, попереднього року. Представлені особливості програмної реалізації запропонованого методу прогнозування попиту з використанням мікро-сервісної архітектури на основі платформи Google Cloud Platform, з використанням таких компонентів як Google Kubernetes Engine, Google BigQuery, Redis. Для зниження обчислювального навантаження на основну систему виконується копіювання необхідних даних для аналізу в OLAP-систему і побудова необхідного прогнозу без використання OLTP-системи. Наведено результати чисельного експерименту щодо прогнозування попиту на товар, отримані на основі реальних даних. Виконано порівняння результатів прогнозування попиту, отриманих з використанням вектора кривої продажів і методу змінного середнього. Показана можливість використання даного методу прогнозування попиту в якості компоненти системи автоматизованого управління запасами в мережах поставок.

**Ключові слова:** товарний запас, управління запасами, прогнозування попиту, вектор кривої продажів, сезонний товар, мікро-сервісна архітектура.

**А. А. NIKULCHENKO**

## FORECASTING OF CUSTOMER DEMAND FOR SEASONAL GOODS USING RETAIL CURVE VECTOR

A method for forecasting the demand for seasonal goods using the vector of distribution of sales during the year, called retail curve vector is proposed. Components of retail curve vector are the weekly sales volumes of the considered or similar product, obtained on the basis of sales statistics for the previous calendar year. The condition of applicability of the proposed method is the fulfillment of the hypothesis about the convergence of the corresponding weekly sales volumes of two consecutive years and the hypothesis about the existence of goods groups with similar sales dynamics. The application of the method allows to build a demand forecast for the goods within the next week based on sales volumes data for the previous few weeks of the current and previous years, as well as sales volumes data for the same week of the previous year. Software architecture to implement proposed method for forecasting demand using a micro-service architecture based on the Google Cloud Platform is presented. Such components as Google Kubernetes Engine, Google BigQuery, Redis as used. To reduce the computational load on the main system, necessary data is copied to the OLAP system and required forecast is build without usage of the OLTP system. The results of numerical experiment on forecasting the demand for goods, obtained on the basis of real data, are presented. Comparison of the results of demand forecasting using the retail curve vector and the moving average method is performed. The possibility of using proposed method of demand forecasting as a component of an automated inventory control system in supply networks is shown.

**Keywords:** inventory stock, inventory control, demand forecasting, retail curve vector, seasonal goods, micro-service architecture.

**Введение.** Задача управления запасами товаров на складе является краеугольной проблемой для большинства торговых сетей. Недостаточное количество товара на складе может привести к невозможности сети вовремя среагировать на возросший потребительский спрос, что приводит к потерянному продажам и снижению прибыли сети. Избыточное количество товара на складе, в свою очередь, приво-

дит к нерациональному использованию операционной прибыли на покупку «ненужных» товаров, и как результат, невозможности ее использования для других нужд бизнеса, порче или обесцениванию товара, излишним расходам на хранение товара и т. д. Именно поэтому задача разработки стратегии оптимального управления запасами всегда привлекала большое внимание [1].

Основу любой модели управления запасами составляет система прогнозирования потребительского спроса [2]. Методы решения задачи прогнозирования спроса отличаются для различных групп товаров. Например, спрос на новую версию iPhone или новую популярную книгу будет существенно отличаться от спроса на туалетную бумагу или другие товары первой необходимости. Существующие различия в динамике спроса на различные товары объясняют наличие большого количества различных моделей прогнозирования спроса, применяемых для различных категорий товаров [3].

Существующие методы прогнозирования потребительского спроса можно разделить на три основные группы [4]: методы экспертных оценок; методы анализа и прогнозирования временных рядов; казуальные (причинно-следственные) методы.

Методы экспертных оценок основываются на субъективной оценке (индивидуальной либо групповой) текущего момента и перспектив развития. Эти методы целесообразно использовать для конъюнктурных оценок, особенно в ситуациях, когда статистическая информация об объемах прошлых продаж отсутствует [5].

Вторая и третья группы методов основаны на анализе количественных показателей, но они существенно отличаются друг от друга. Методы анализа и прогнозирования временных рядов связаны с исследованием изолированных показателей, каждый из которых складывается из двух элементов: прогноза детерминированной компоненты и прогноза случайной компоненты. Построение первого прогноза не представляет особых трудностей, если определена основная тенденция развития и возможна ее экстраполяция, т. е. распространение на будущее. Наиболее известными методами прогнозирования, основанными на экстраполяции, являются методы, использующие модель авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA). Своей популярностью эти методы, в первую очередь, обязаны работам Дж. Бокса и Г. Дженкинса [6], предложившим и развившим обобщенную модель ARIMA. Прогноз случайной компоненты построить сложнее, так как он требует учета ее статистических свойств и позволяет получить результат лишь с некоторой вероятностью [7].

В основе казуальных методов прогнозирования лежит поиск факторов, которые влияют на значения прогнозируемого показателя, что приводит к необходимости построения модели, учитывающей взаимосвязь факторов. В случае прогнозирования потребительского спроса на товар построение подобной модели требует учета очень большого количества разнообразных факторов и потому является достаточно трудоемкой [8].

Одним из важнейших факторов, которые учитываются при построении прогноза спроса являются сезонные колебания – повторяющиеся с некоторой периодичностью изменения показателей. Наблюдая их в течение длительного промежутка времени можно выявить скрытые закономерности, характерные для каждого вида товара. Например,

объем продаж детской обуви возрастает перед началом учебного года, увеличение потребления свежих овощей и фруктов происходит осенью, повышение объемов продаж строительных материалов – летом и т. д. Периодические колебания в розничной торговле можно обнаружить и в течение определенных недель месяца или года.

При анализе сезонных колебаний обычно рассчитывается индекс сезонности [9] как отношение среднего объема продаж за соответствующий месяц (или неделю) к общему среднему значению этого показателя за год в процентах.

В данной статье рассматривается метод прогнозирования спроса на основе понятия «кривая продаж» (Retail Curve) [10]. Данный метод хорошо зарекомендовал себя для категории товаров, имеющих сезонные колебания спроса. Примером может служить одежда, характерной особенностью которой является очень длинный цикл разработки (включая разработку дизайна, закупку сырья, пошив и доставку товара на склад), что требует построения прогноза спроса на длительный период, и как результат, невозможность использовать методы краткосрочного прогнозирования.

**Описание метода прогнозирования.** Введем понятие недельного объема продаж  $P(x, y, z)$  как суммарное количество единиц проданного товара вида  $x$  в течение определенной недели  $z$  в некотором году  $y$ . Тогда общее количество единиц товара  $x$ , проданное в течение года  $y$ , обозначим  $P(x, y, *)$ .

Построим вектор  $\mathbf{RCV}(x, y)$ , размерность которого равна количеству недель в году, а значение каждого элемента равно количеству единиц товара  $x$ , проданному в течение соответствующей недели рассматриваемого года  $y$ . Полученный вектор называют распределением объемов продаж в течение года или вектором кривой продаж (Retail Curve Vector, RCV). Для вычисления значений вектора используется формула

$$\mathbf{RCV}(x, y)_z = \frac{P(x, y, z)}{P(x, y, *)} \cdot 100 \% . \quad (1)$$

Предлагаемый метод прогнозирования спроса основывается на двух гипотезах.

*Гипотеза 1.* Вектор кривой продаж для данного вида товара и некоторого года несущественно отличается от вектора кривой продаж данного товара в предыдущем году

$$\forall x \in X, \forall y \in Y: \|\mathbf{RCV}(x, y) - \mathbf{RCV}(x, y - 1)\| \leq \delta, \quad (2)$$

где  $X$  – множество всех рассматриваемых товаров;

$Y$  – множество рассматриваемых лет, на основе которых строится прогноз спроса;

$\delta$  – некоторая заданная константа.

Очевидно, что гипотеза 1 может быть верна для одних товаров и не верна для других товаров. Например, спрос на новую популярную книгу или на новый iPhone будет иметь «пик» в момент выхода



этого товара и, естественно, не будет иметь подобного «пика» в следующем году. А вот спрос на товары зимнего или летнего ассортимента будет сохранять свою сезонность и периодичность из года в год, что делает возможным применение данной гипотезы.

Таким образом, можно сделать вывод, что данная гипотеза, а соответственно и построенный на ее основе метод прогнозирования, применим для «сезонных» товаров. Для определения того, какие товары можно считать «сезонными», предлагается использовать следующий алгоритм.

1. Определить величину  $\delta$ , значение которой соответствует допустимой точности будущего прогноза.

2. Используя данные об объемах продаж рассматриваемого товара за два последовательно идущих года, вычислить  $\|RCV(x, y) - RCV(x, y - 1)\|$ .

3. Если неравенство (2) выполняется, то товар  $x$  является «сезонным».

*Гипотеза 2.* Рассматриваемое множество товаров  $X$  можно разбить на некоторые группы таким образом, что разность векторов кривых продаж для товаров, относящихся к одной группе, является незначительной, то есть выполняется следующее условие

$$\forall y \in Y, \exists G \in X, \forall x_1, x_2 \in G: \|RCV(x_1, y) - RCV(x_2, y)\| \leq \delta. \quad (3)$$

Для разбиения товаров на группы выполняется проверка неравенства (3) для каждой пары товаров либо используются результаты экспертных оценок.

Предполагая, что для любого товара  $x$  из множества  $X$  и любого года  $y$  выполняется гипотеза 1, и товары разбиты на группы таким образом, что для любых товаров из одной группы  $G$  выполняется неравенство (3), прогноз спроса на одну неделю вычисляется по формуле

$$P(x, y, z) = \frac{\sum_{i=1}^N P(x, y, z - i)}{\sum_{i=1}^N RCV(x, y - 1)_i} RCV(x, y - 1)_z, \quad (4)$$

где  $N$  – величина временного интервала, равная количеству недель, данные о продажах за которые используются для построения прогноза.

Поясним идею метода построения прогноза спроса на примере. Предположим, что закончилась 6-я неделя текущего года, и необходимо построить прогноз спроса на следующую неделю. По данным прошлого года известно, что за первые 6 недель было продано в 3 раза больше единиц рассматриваемого товара, чем за 7-ю неделю. Используя первую гипотезу, можно предположить, что за следующую неделю текущего года, аналогично прошлому году, будет продано в 3 раза меньше единиц данного товара, чем за первые 6 недель данного года.

Однако, данные об объемах продаж товара за прошлый год могут быть недоступны. Например, если рассматривается одежда, то конкретная модель куртки могла не выпускаться в прошлом году, но аналогичная

модель – выпускалась. Таким образом, фактически выполняется условие «сезонности» для группы товаров, а не для одного конкретного товара.

Для учета этого фактора вместо данных об объемах продаж конкретного товара за прошлый год используются данные об объемах продаж аналогичных товаров из данной группы.

**Программная архитектура.** Как правило, данные об объемах продаж товаров хранятся в OLTP (On-Line Transaction Processing) базе данных. Реализация предложенного алгоритма построения прогноза спроса может потребовать значительных вычислительных ресурсов и накладывать существенную дополнительную нагрузку на OLTP базу данных, тем самым внося сбой в работу основной системы. Чтобы избежать подобных отрицательных эффектов работы системы прогнозирования спроса для ее реализации предложена архитектура с использованием Google Cloud Platform, в частности таких ее компонентов как Google BigQuery, представляющем собой OLAP (On-Line Analytical Processing) [11] базу данных и Google Kubernetes Engine (micro-service container platform) [12].

Компонентная диаграмма разработанной архитектуры представлена на рис 1.

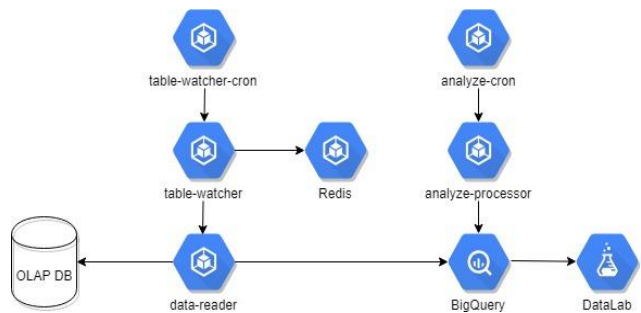


Рис. 1. Компонентная диаграмма архитектуры системы прогнозирования спроса

Основная цель предложенной архитектуры – организовать копирование необходимых данных для анализа в OLAP базу данных, в данном случае Google BigQuery, и построение требуемого прогноза без использования OLTP-системы. В качестве вычислительных ресурсов используется Google Kubernetes Engine – облачная платформа для вычисления решения с использованием микро-сервисной архитектуры на основании Docker контейнеров.

Описание компонентов системы прогнозирования спроса приведено в таблице 1.

**Численный эксперимент.** Для выполнения численного эксперимента использованы данные, предоставленные компанией Teamwork Retail LTD (<https://www.teamworkretail.com>), которая занимается разработкой ПО для управления сетями поставок. В целях конфиденциальности, название конкретной сети поставок не разглашается.

Прогноз спроса на конкретный вид сезонного товара был построен для 7-й, 8-й и 9-й недели 2018 года на основании данных об объемах продаж первых 6-ти недель 2018 года и данных 2017 года.

Таблица 1 – Компоненты архитектуры системы построения прогноза спроса

Компонент	Описание	Технология
OLAP DB	OLAP база данных, содержащая исходные данные. В данном случае используется Microsoft SQL Server 2016.	Microsoft SQL Server 2016
table-watcher-cron	CRON скрипт, запускающийся по указанному расписанию и вызывающий table-watcher компонент.	Google Kubernetes Engine CRON
table-watcher	Анализирует список таблиц, необходимых для синхронизации, а также время последней синхронизации для каждой из таблиц (хранящиеся в Redis) и дает команду data-reader на синхронизацию определенной таблицы.	Google Kubernetes Engine, .NET Core 2.1
Redis	Высокопроизводительное нереляционное распределённое хранилище данных. В данной архитектуре используется для хранения последней даты синхронизации для каждой из таблиц.	Google Kubernetes Engine, Redis 2.8
data-reader	Компонент, получающий задачу на синхронизацию определенной таблицы, начиная с указанного времени, и выполняющий чтение данных из указанной таблицы в OLAP базе и запись копии этих данных в OLAP базу.	Google Kubernetes Engine, .NET Core 2.1
BigQuery	Google BigQuery – это облачная OLAP база данных с высочайшей скоростью обработки огромных массивов данных.	Google BigQuery
analyze-cron	CRON скрипт, запускающийся по определённому расписанию и вызывающий analyze-processor.	Google Kubernetes Engine CRON
analyze-processor	Выполняет анализ и строит прогноз с использованием скриптов на базе Google BigQuery, после чего сохраняет результат прогноза в BigQuery.	Google Kubernetes Engine, .NET Core 2.1
DataLab	Используется для визуализации результатов анализа.	Google DataLab

Результаты прогнозирования спроса, полученные с помощью предложенного метода, сравнивались с результатами, полученными с использованием метода скользящего среднего. Оба прогноза показали похожие результаты для 7-й недели 2018 года, однако уже для 8-й и 9-й недель в результатах прогноза, полученного с использованием скользящего среднего, начала «накапливаться» ошибка, в то время как метод с использованием Retail Curve показал такой же порядок ошибки прогноза.

**Выводы.** В статье предложен метод прогнозирования спроса на сезонные товары, основанный на использовании вектора кривой продаж. Предложена и реализована программная реализация данного метода прогнозирования на основании микро-сервисной архитектуры ПО на основе платформы Google Cloud Platform. Проведен численный эксперимент с использованием разработанной реализации и выполнено сравнение результатов прогнозирования спроса, полученных с использованием Retail Curve, с базовым методом прогнозирования. Результаты численного эксперимента свидетельствуют об эффективности предложенного метода прогнозирования спроса для решения реальных задач управления запасами в сетях поставок. Программная реализация была передана компании Teamwork Retail LTD для встраивания в разрабатываемое компанией ПО для управления сетями поставок.

#### Список литературы

1. Бродетский Г. Л. *Управление запасами: Учебное пособие*. Москва: Эксмо, 2008. 352 с.
2. Чеканский А. Н., Фролова Н. Л. *Теория спроса, предложения и рыночных структур*. Москва: ТЕИС, 1999. 421 с.

3. Беляевский И. К. *Маркетинговое исследование: информация, анализ, прогноз: Учебное пособие*. Москва: Финансы и статистика, 2002. 320 с.
4. Ильенкова Н. Д. *Спрос: анализ и управление*. Москва: Финансы и статистика, 2006. 248 с.
5. Литвак Б. Г. *Экспертные оценки и принятие решений*. Москва: Патент, 1996. 271 с.
6. Бокс Дж., Дженкинс Г. *Анализ временных рядов. Прогноз и управление*. Вып. 1 и 2. Москва: Мир, 1974. Вып. 1 – 408 с. Вып. 2 – 200 с.
7. Лукашин Ю. П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учебное пособие*. Москва: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
8. Hofmann E., Rutschmann E. Big data analytics and demand forecasting in supply chains: a conceptual analysis. *The International Journal of Logistics Management*, 2018. Vol. 29. Issue 2. P. 739–766.
9. Бушуева Л. И. Методы прогнозирования объема продаж. *Маркетинг в России и за рубежом*. URL: <http://dis.ru/library/531/21984/> (дата обращения: 02.06.2018).
10. Oracle® retail curve configuration guide. Release 13.0. URL: [https://docs.oracle.com/cd/E12473\\_01/curve/pdf/130/curve-130-cg.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E12473_01/curve/pdf/130/curve-130-cg.pdf) (дата обращения: 10.05.2018).
11. Thomsen E. *OLAP solutions – building multidimensional information systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 339 p.
12. Chen L. *Microservices: architecting for continuous delivery and DevOps*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323944215> (дата обращения: 11.12.2017).

#### References (transliterated)

1. Brodetskii G. L. *Upravlenie zapasami: Uchebnoe posobie* [Inventory Control: Tutorial]. Moscow, Eksmo Publ., 2008. 352 p.
2. Chekanskii A. N., Frolova N. L. *Teoriya sprosa, predlozheniya i rynochnykh struktur* [Theory of demand, supply and market structures]. Moscow, TEIS Publ., 1999. 421 p.
3. Belyaevskii I. K. *Marketingovoe issledovanie: informatsiya, analiz, prognoz: Uchebnoe posobie* [Marketing research: information, analysis, forecast: Tutorial]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 320 p.
4. Ilenkova N. D. *Spros: analiz i upravlenie* [Demand: analysis and control]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2006. 248 p.

5. Litvak B. G. *Ekspertnyie otsenki i prinyatie resheniy* [Expert evaluations and decision-making]. Moscow, Patent Publ., 1996. 271 p.
6. Box G. E. P., Jenkins G. M. *Time series analysis: forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1970, 575 p. (Rus. ed.: Box G. E. P., Jenkins G. M. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie*. Moscow, Mir Publ., 1974. 408 p.).
7. Lukashin Yu. P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov: Uchebnoe posobie* [Adaptive methods of short-term forecasting of time series: Tutorial]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003. 416 p.
8. Hofmann E., Rutschmann E. Big data analytics and demand forecasting in supply chains: a conceptual analysis. *The International Journal of Logistics Management*, 2018, vol. 29, issue 2, pp. 739–766.
9. Bushueva L. I. *Metody prognozirovaniya ob'ema prodazh* [Methods for forecasting sales]. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Marketing in Russia and abroad]. URL: <http://dis.ru/library/531/21984/> (accessed 02.06.2018).
10. Oracle® retail curve configuration guide. Release 13.0. Available at: [https://docs.oracle.com/cd/E12473\\_01/curve/pdf/130/curve-130-cg.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E12473_01/curve/pdf/130/curve-130-cg.pdf) (accessed 10.05.2018).
11. Thomsen E. *OLAP solutions – building multidimensional information systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002, 339 p.
12. Chen L. *Microservices: architecting for continuous delivery and DevOps*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323944215> (accessed 11.12.2017).

Поступила (received) 04.06.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Нікульченко Артем Олександрович (Никольченко Артем Александрович, Nikulchenko Artem Aleksandrovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2154-291X>; e-mail: [an@cloudwk.com](mailto:an@cloudwk.com)

**S. V. SHEVCHENKO, D. O. DRUPPOV, M. I. BEZMENOV**

### **SITUATIONAL FORECASTING OF ELECTRICITY DEMAND IN THE REGION**

The process of forecasting volumes of electricity sales on the wholesale market is considered. To improve the quality of the forecast, it is proposed to use the method of machine learning Random Forests as part of the solution of the task of situational forecasting of electricity consumption. A comparison of the Random Forests with a simple linear regression is performed. The forecast is based on historical data on electricity consumption in Ukraine, as well as changes in cost per hour of consumption and a number of key factors. Forecasting takes into account weather conditions, macro – financial and economic characteristics. When the software was implemented, the library used includes the implementation of the prognostic algorithms Spark MLlib, which specializes in machine learning methods. Training samples were created based on historical data found in different open sources. In the introduction section the justification of the problem of forecasting demand for electricity and the impossibility of taking into account all factors affecting the environment when using standard approaches is made. In the results section, a number of indicators have been calculated capable of determining the accuracy of the forecast: the mean square error, the mean relative error and the absolute error. In the mathematics section, a description and analysis of the Random Forests algorithm was given. The graphs were built showing the results of the forecast in different time periods: one day, one week, one year. The results were compared with the original historical data. Added tables that show the input data and the results obtained using linear regression and the algorithm of machine learning Random Forests. In conclusion, conclusions were drawn about the effectiveness of the algorithm Random Forests, as well as a possible problem when working with machine learning algorithms.

**Keywords:** Forecasting, Electric Power System, Smart Grid, Machine Learning, Random Forests, Algorithm.

**С. В. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДРУПPOB, М. І. БЕЗМЕНОВ**

### **СИТУАЦІЙНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ В РЕГІОНІ**

Розглядається процес прогнозування обсягів продажу електроенергії на оптовому ринку. Для поліпшення якості прогнозу пропонується використання методу машинного навчання Random Forests у складі вирішення задачі ситуаційного прогнозування споживання електроенергії. Робиться порівняння методу Random Forests з звичайною лінійною регресією. Прогноз виконується на базі історичних даних споживання електроенергії в Україні, а також змін вартості за одну годину споживання електроенергії і ряду ключових факторів. При прогнозуванні враховувалися показники погодних умов, макрофінансові та економічні характеристики. При реалізації програмного забезпечення була використана бібліотека Spark MLlib, що містить реалізацію прогностичних алгоритмів та спеціалізується на методах машинного навчання. Для алгоритмів були створені навчальні вибірки на базі історичних даних, знайдених у різних відкритих джерелах. У розділі Вступ робиться обґрунтування актуальності задачі прогнозування попиту електроенергії і неможливість врахування всіх факторів, що впливають на середовище при використанні стандартних підходів. Обчислено ряд показників, здатних визначити точність прогнозу: середня квадратична помилка, середня відносна і абсолютна помилки. Побудовано графіки, що відображають результати прогнозу в різних часових періодах: один день, один тиждень, один рік. Було виконано порівняння отриманих результатів із вихідними історичними даними. У розділі математичного обґрунтування наводиться детальний опис і аналіз алгоритму Random Forests. Додано таблиці, в яких наведені вхідні дані і отримані результати за допомогою лінійної регресії і алгоритму машинного навчання Random Forests. На завершення було зроблено висновки щодо ефективності алгоритму Random Forests, а також можливі проблеми при роботі з алгоритмами машинного навчання.

**Ключові слова:** прогнозування, електроенергетична система, Smart Grid, Машинне навчання, Random Forests, алгоритм.

**С. В. ШЕВЧЕНКО, Д. А. ДРУПPOB, Н. И. БЕЗМЕНОВ**

### **СИТУАЦИОННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В РЕГИОНЕ**

Рассматривается процесс прогнозирования объемов продаж электроэнергии на оптовом рынке. Для улучшения качества прогноза предлагается использование метода машинного обучения Random Forests в составе решения задачи ситуационного прогнозирования потребления электроэнергии. Делается сравнения метода Random Forests с обычной линейной регрессией. Прогноз выполняется на базе исторических данных потребления электроэнергии в Украине, а также изменений стоимости электроэнергии за один час потребления и ряда ключевых факторов. При прогнозировании учитывались показатели погодных условий, макрофинансовые и экономические характеристики. При реализации программного обеспечения была использована библиотека Spark MLlib, которая содержит реализацию прогностических алгоритмов и специализируется на методах машинного обучения. Для алгоритмов были созданы обучающие выборки на основании исторических данных, найденных в различных открытых источниках. В разделе Введение делается обоснование и актуальность задачи прогнозирования спроса электроэнергии и невозможность учета всех факторов, оказывающих влияние на среду при использовании стандартных подходов. Вычислено ряд показателей способных определить точность прогноза: средняя квадратическая ошибка, средняя относительная и абсолютная ошибки. В разделе математического обоснования приводится детальное описание и разбор алгоритма Random Forests. Построены графики, отображающие результаты прогноза в различных временных периодах: один день, одна неделя, один год. Было выполнено сравнение полученных результатов с исходными историческими данными. Добавлены таблицы, в которых приведены входные данные и полученные результаты с помощью линейной регрессии и алгоритма машинного обучения Random Forests. В заключении были сделаны выводы об эффективности алгоритма Random Forests, а также возможной проблеме при работе с алгоритмами машинного обучения.

**Ключевые слова:** прогнозирование, электроэнергетическая система, Smart Grid, Машинное обучение, Random Forests, алгоритм.

**Introduction.** Operational planning and effective management of the electricity system (ES) are impossible without reliable forecast of the load in the nodes of the calculation scheme, conducted in advance within a few minutes to several days. The forecast of nodal loads is necessary for optimization and correction of current modes, consideration of operational dispatch requests related to the withdrawal of electric equipment for repair,

for examinations, and others. A particular importance is given to this problem in connection with the transition to a competitive electricity market. Load nodes is considered consumption of active and reactive power in the substitution circuit of the electrical network. The load at the node for each time period is determined by the loadings of the set of receivers of the electrical network connected to this EC node, and the loss of power when

© S. V. Shevchenko, D. O. Drupov, M. I. Bezmenov, 2018

transmitting electricity to this node [1]. The need for qualitative prediction is a result of technological and economic reasons [2]. Technological reasons are connected with the key role of forecasting in the processes of planning energy balances and power system capacity, determined by the modes of parameters: technical and economic indicators of electricity consuming objects and calculations of electrical loads in power nodes and sections.

Forecasting of future indicators of electric consumption allows achieving the most important principle of forming a reliable and efficient operation of the Unified Energy System ensuring a clear system balance of production and consumption of electric energy under the conditions of simultaneous momentum of these processes. Balance electricity production and consumption is the basis of technological stability of the power system, it determines the system reliability and continuity of its operation. In case of violations of the balance conditions, the quality of the electricity deteriorates (changing the parameters of the frequency and voltage of the network), which reduces the efficiency of the work of the consumer equipment of end users.

There is a number of economic reasons that necessitate qualitative forecasting. Accurate calculations provide an optimal distribution of the load between power plants in the grid and improve the quality of electricity. Forecasting and planning of electricity consumption indicators for large consumers allows managing the cost of purchasing electricity through the regulation of equipment loading with the help of production processes management, transforming the main volumes of electricity consumption in the hours with the lowest cost, thereby reducing the cost of production and the amount of payments to energy supplying organizations.

A particular relevance the forecasting task was acquired after the emergence of the wholesale electricity market, the rules of which require the need for accurate forecasting of the electricity volume in order to make its purchase in the wholesale market [3].

In accordance with these rules, market participants should make a forecast of their planned hourly consumption and the day before the operational one, to submit an hourly request for electricity consumption to the system administrator for every hour of operating days. It means that all market players should fulfill their electricity consumption forecasts, as well as the hourly discretion for a few days ahead. Substandard submission by the enterprise of a participant in applications for electricity can lead to significant economic losses. Mistakes in forecasting reduce the quality of management of the electricity supply and worsen the cost-effectiveness of its complex regimes. In case of deviation of the actual hourly rates from the forecast, the participants are imposed with penalties that increase the cost of purchased electricity. This is due to the feature of electricity as a commodity. Under estimation of the forecast leads to the need to use emergency power. Exaggeration of the forecast leads to an increase in the cost of maintaining reserve power in the operating state. For the consumer that acquires electricity

on the wholesale and (or) retail market, there is the problem of accurate application power consumption for some time ahead. This is due to the fact that excessive or inadequate electricity consumption booked by the previous applications of the enterprise-user leads to unscheduled costs of the supplier at the point of generation. Therefore, increasing the accuracy of the forecast even by a tenth of a percent can lead to a significant reduction in the cost of paying deviations from the plan for the supply of electricity [4]. It turns out that the task of forecasting is highly relevant for a large number of players operating in the wholesale electricity market: guaranteeing suppliers serving the consumers of entire regions, independent energy sales organizations serving individual industrial enterprises in different regions, and for large economic entities that buy electricity on the wholesale market for their own consumption needs. Therefore, qualitative forecasting of electricity consumption for the subjects of the wholesale market is economically feasible and in today's highly competitive conditions, it receives an increasing relevance. The article describes a detailed description of the Random Forests algorithm and based on historical data for previous years makes a forecast that is compared with the forecast of linear regression and real historical data.

**Task setting.** One of the distinguishing features of the technological process of making decisions on the planning of electricity supply is the cyclicity (repetition) and the relationship of problems being solved to input and output data. As a result on of the accuracy and reliability of the electricity consumption forecast depends on the accuracy of the solution of the load optimal distribution tasks between the generating capacities, the efficiency of the management of the combined energy system and the management of power consumption and, that is especially important in market conditions, the wholesale price of purchases from the generating companies and, hence, the wholesale price of sales to electricity suppliers at the wholesale electricity market.

When moving to the free trade sector, in addition to winning from participation in competitive bidding, the wholesale market entity takes some risks associated with the impossibility of an exact planning of the application for electricity consumption. Deviations of actual consumption from declared values above a certain percentage values lead to the purchase of electricity from a balancing market at a higher price. Deviation to the smaller side is also punishable by payment of non-delivered electricity, determined by the difference between the declared and actual consumption at the established rates. The forecast is especially responsible for those power systems that do not have their own generating capacities, and there is no possibility to influence the electricity loads of consumers. The complexity of the forecast of electricity consumption is due to the presence of a large number of consumers and the need to take into account many factors affecting the consumption of electricity. This is a ambient temperature, degree of illumination, longitude of the day, day of the week, transitions from winter to summer time and back, the

presence of extraordinary events (catastrophes, mass actions), weather forecasts, the state of other factors affecting the change in consumption in accordance with the data obtained from the processing of consumption statistics, planned inclusion/disconnection of energy-intensive industries. For the solution of the problem of forecasting power consumption, traditional statistical models (regression models and time series models), models based on expert systems, artificial neural networks (ANN), and machine-driver algorithms can be used.

**Ways of solution.** The choice of the optimal method for solving a particular practical problem is a separate and rather difficult task. Up to nowadays in many power-systems in the world, when creating forecasting models, statistical methods of analysis are used: dynamic (time) rows, that are ordered sequences of observations of a process that changes over time. A sufficient number of mathematical stochastic methods of forecasting electric load schedules is known, their practical implementation in order to reduce the error of calculations requires the collection and subsequent use of significant volumes of output retrospective data of real hourly production of electricity. Determination and correction of errors that is maintaining a certain level of account correctness affecting the forecast result requires additional amount of data.

In connection with the transition to the balancing market and the market of bilateral agreements between direct producers and suppliers of electricity to solve the problem of prediction of electrical load in the ES, including one day ahead, can find and use new information technologies that are developed on the basis of the device expert systems, artificial neural networks, cellular automata, machine learning and others.

**Mathematics.** The decision trees are the greedy algorithm for building the chain if then else for constructing data forecasting models. Allows getting stable solutions that are comparable to SVM [5] and Neurons networks [6], while not using the high computing power required by the previous ones.

The most effective method of improving any algorithms based on deciduous trees was proposed by Leo Breiman and Adele Cutler in 2001 [7, 8]. They proposed an algorithm called Random Forests. Its main idea is use one tree instead of a whole ensemble of deciduous trees built with a few modified algorithms. At the same time, the essence of the struggle with the problem solving of ineffective selection of features was to use in the process of constructing a tree of some random samples that removes the determinism of tree construction and makes this process stochastic. Let us proceed directly to the description of the algorithm. We give a statement of the problem in the general case. Let us give a set of  $A$  power objects  $N$ , a component of the learning sample and has a set of  $(M + 1)$  attributes. The set of first  $M$  attributes is denoted by  $Q$ . For a given set  $A$  all  $(M + 1)$ , the attributes are known. For other (new) known elements of the first  $M$  attributes, the target  $(M + 1)$  attribute is needed to be found. At the same time, the parameter  $N$ ,

the number  $M \geq 1$ , parameters  $m \leq M, mq \leq M$ , some parameter  $r (0 < r \leq 1)$  and the parameter number of trees in the ensemble  $NTrees \geq 1$  are given to the input. A generalized prediction algorithm based on Random Forests looks like:

Basing the original training set  $A$ , a random sample with  $rN$  repetitions is generated. Basing on the generated sample, a decision tree is constructed (in the general case, any algorithm for constructing deciduous trees can be used for this task). Moreover, during the construction of the next node of a tree with  $M$  of existing features, on the basis of which it is possible to divide the tree, we choose  $mq$  random. The partition decision is made on the basis of the best of  $mq \leq M$  selected characteristics (ie, based on the application of the branching criterion to  $mq$  signs).

The procedure is repeated  $NTrees$  times. The resulting  $NTrees$  random trees combine into an ensemble. The classes are defined for the next new element, (its value  $(M + 1)$  parameter) using all  $NTrees$ -constructed trees and choose the resulting class for the one that "voted" by the most trees. Each tree is constructed using the following algorithm in fig. 1:

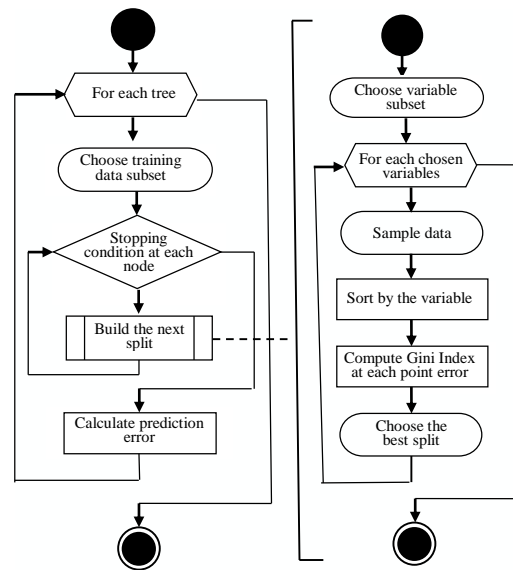


Figure 1 – Flow chart of Random Forests algorithm

Let the number of training cases be  $N$  and the number of variables in the classifier be  $M$ .

- It is given the number  $m$  of input variables to be used to determine the decision at a node of the tree;  $m$  should be much less than  $M$ .
- Choose a training set for this tree by choosing  $n$  times with replacement from all  $N$  available training cases (i.e. take a bootstrap sample). Use the rest of the cases to estimate the error of the tree, by predicting their classes.
- For each node of the tree, randomly choose  $m$  variables on which to base the decision at that node. Calculate the best split [9] based on these  $m$  variables in the training set.

- Each tree is fully grown and not pruned (as may be done in constructing a normal tree classifier).

For prediction, a new sample is shifted down the tree. It is assigned the label of the training sample in the terminal node it ends up in. This procedure is iterated over all trees in the ensemble and the average vote of all trees is reported as Random Forests prediction.

Consider the complexity of the proposed algorithm based on the random forests. We will consider the variant of the algorithm's operation with the following parameters:  $r = 1, mq = M$ . With these values of parameters, the computational complexity of the algorithm will be greatest. Then the complexity of constructing a single tree will coincide with the complexity of constructing the original deciduous tree without modifications. In this case the complexity of the entire algorithm for constructing a random forests will be determined as follows:

$$Trf = O(T \cdot NTrees) = O(NTrees \cdot t^2 \cdot n^m).$$

This complexity can be reduced if you do not build the entire forest at once and engage in the construction of only those branches in each tree from the forest, which are needed to predict this particular element. Taking as a basis the proposed adaptive algorithm for constructing trees in a random forests, we asymptotically reduce the complexity to the following value:

$$Trf = O(T \cdot NTrees) = O(NTrees \cdot k \cdot t^2),$$

where  $k$  is the number of elements that need to be predicted. We call the received modification of the "Random Forests" algorithm in application to the task of forecasting the time series of the adaptive algorithm "Random Forests".

**Methods.** The method described here is simple, a learning sample was created, based on historical data that was taken from different public sources. That training sample was used by the Random Forests algorithm, in our case, we used the Spark MLlib [10] software library to solve the regression problem, it supports different algorithms and Random Forests in particular. The training sample was presented in LIBSVM [11] format. In this format, each line represents a single set of data with the result and attributes values.

The first value is the result, others represent the input data. Example lines in LIBSVM format using formula:

$$y(\text{result})1: x1: 2: x2: 3: x3 \dots n: xn.$$

Then simple software program was implemented that able to load training sample and make a prediction using Spark MLlib [10].

After the training sample was loaded, the training was completed, and algorithm could make a prediction based on new LIBSVM data in vector format. The complexity of working with Spark MLlib comes down to find a relevant training sample.

**Results.** Overall the results presented below show that forecasting of electric energy consumption includes a number of factors among that a considerable importance takes weather conditions: temperature, humidity, wind speed, and others. Weather indicators are essential factors that influence the consumption of electricity, during the analysis of historical data, it was concluded that at low temperatures and high wind speed, electricity consumption figures are increasing. Thus, indicators for winter periods exceed the rates for the warmer ones: in the fall or in the summer season. The main task when working with the algorithms of machine learning is the collection of historical data. During the computation of the results the following data were collected. The weather data was taken from the site [12], and data on electricity consumption were obtained from site [13] in the interval of 3 years 2006–2008, based on which the learning algorithm was made. It is also worth mentioning that weather conditions are far from all indicators that affect consumption, but weather is a significant criterion in forecasting demand for electricity in the region. An important factor is the large amount of historical data, so that the algorithm can do the training.

To test the Random Forests algorithm a sample in the LIBSVM data format was created.

In tab. 1 contains data for the weekly chart. For a monthly forecast, the data has a similar structure to which month and year are added. Also, the table shows the forecast data using linear regression to compare the Random Forests algorithm with standard forecasting approaches.

From the graphs in fig. 2 and fig. 3 the results of the forecast have rather good performance. To ensure this, the mean squared error (MSE) for the given formula is calculated:

$$m = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\Delta^2}{n}}, \quad (1)$$

where  $n$  – the number of forecasts;

$\Delta$  – the difference between historical data and predicted.

The average absolute value of the error is calculated as:

$$\Delta'_{\text{av. abs. err.}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - y_t^*|, \quad (2)$$

Average relative error (approximation error) is calculated as:

$$\epsilon_{\text{av. rel. err.}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - y_t^*|}{y_t}, \quad (3)$$

where  $y_t$  – historical value,

$y_t^*$  – predicted value

$n$  – the number of forecasts.

Table 1 – Input data and Results for forecasting electricity demand

Historical data	Forecast		Weather indicators		
Demand for electricity (MW*hour)	Demand for electricity RF	Demand for electricity REG	Air Temperature (C)	Air humidity, %	Wind speed, ms
590	586.4	579	-15	70	4
580	574.3	567.3	-12.9	65	5
570	566.7	564.3	-15.9	75	7
590	584.4	577.1	-16.5	65	4
600	591.1	582.5	-14.9	80	4
590	584.4	581.3	-15.2	80	1
600	593.7	588.3	-14.2	80	4

From the graphs in fig. 2 and fig. 3 the results of the forecast have rather good performance.

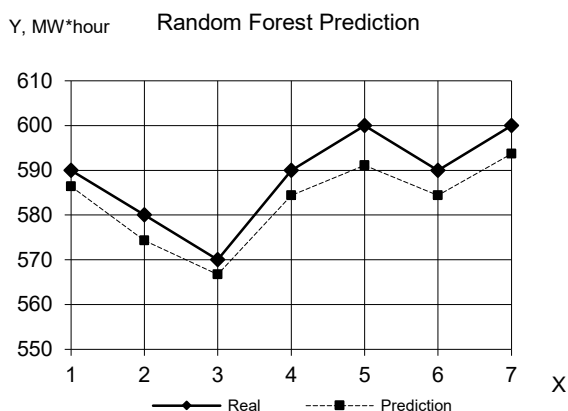


Figure 2– Results of the Random Forests algorithm for a weekly forecast

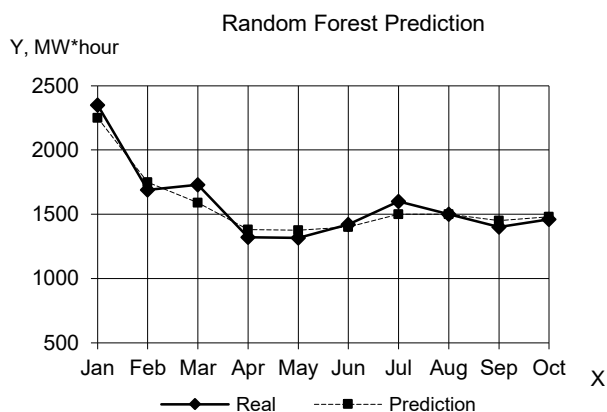


Figure 3 – Prediction of Electricity Demand Random Forests method

To ensure this, the mean squared error (MSE) for the given formula is calculated: forecast data using linear regression to compare the Random Forests (RF) algorithm with standard forecasting approaches (REG) using formula (1).

To estimate the accuracy of the Random Forests algorithm, we calculate MSE for regression from tab. 1:

$$m_{REG} = \sqrt{\frac{(590 - 579)_1^2 + \dots + (600 - 588.3)_7^2}{7}} = 11.98.$$

In the same way

$$m_{RF} = \sqrt{\frac{(590 - 586.4)_1^2 + \dots + (600 - 593.7)_7^2}{7}} = 5.83.$$

We have

$$m_{RF} < m_{REG}.$$

The relative average and absolute mean errors for Linear Regression by formulas (2)–(3) were calculated:

$$\epsilon_{av. rel. err. REG} = \frac{16.26}{7} \approx 2.32,$$

$$\Delta'_{av. abs. err. REG} = \frac{96.2}{7} \approx 13.74.$$

The relative average and absolute mean errors for Random Forests were calculated

$$\epsilon_{av. rel. err. RF} = \frac{6.72}{7} \approx 0.96,$$

$$\Delta'_{av. abs. err. RF} = \frac{39.1}{7} \approx 5.57.$$

In tab. 2 the test data for forecasting the cost of electricity in the wholesale market is presented.

For the forecast a number of indicators influencing the price characteristics were selected: the cost of raw materials: natural gas and coal were taken from the site [14, 15], the dollar exchange rate for the current month was obtained from the site [16] as well as the wholesale average monthly price per hourly segments for one month was taken from the site [13]. Also, there are a few essential global macroeconomic parameters as Gross



Table 2 – Results and input data for the forecast of the wholesale price of the electricity power per day

Forecast wholesale price RF (kop / kW*hour)	Forecast wholesale price REG (kop/ kW*hour)	Historical wholesale prices (kop / kW*hour)	Cost of natural gas (Dollars for 1 MMBTU)	Demand for coal (million tons)	Hours	Dollar exchange rate (UAH)	Gross domestic product (UAH million)	GDP Per capita income (USD)	Size of investments (USD million)
<b>Year 2006</b>									
13.50	16.50	13.55	7.34	40.6	1	5.05	544153	7070	5737
13.45	14.30	12.91	7.34	40.6	2	5.05	544153	7070	5737
13.21	17.40	12.87	7.34	40.6	3	5.05	544153	7070	5737
12.79	18.79	12.86	7.34	40.6	4	5.05	544153	7070	5737
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13.06	15.05	12.86	7.34	40.6	24	5.05	544153	7070	5737
<b>Year 2007</b>									
14.11	17.09	13.90	7.36	40.7	1	5.03	720731	7 890	9218
11.23	16.04	10.70	7.36	40.7	2	5.03	720731	7 890	9218
10.91	17.49	10.47	7.36	40.7	3	5.03	720731	7 890	9218
11.23	19.91	10.36	7.36	40.7	4	5.03	720731	7 890	9218
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
13.54	19.45	14.05	7.36	40.7	24	5.03	720731	7 890	9218
<b>Year 2008</b>									
14.24	19.89	15.60	10.16	41.2	1	8.50	948056	8 320	9903
13.01	18.15	12.86	10.16	41.2	2	8.50	948056	8 320	9903
13.75	20.56	13.28	10.16	41.2	3	8.50	948056	8 320	9903
13.80	18.09	13.29	10.16	41.2	4	8.50	948056	8 320	9903
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16.01	28.67	16.94	10.16	41.2	24	8.50	948056	8 320	9903

domestic product [17], GDP per capita [18] and foreign investments [19].

Figure 3 shows the forecast made by the Random Forests algorithm based on the data obtained from years 2006–2008. The forecast was drawn up for a period of 10 months. Axis X – months of the year. Axis Y – demand for energy in MW\*hour.

Figure 4 shows the forecast of the calculation of the wholesale price for each hour (kop / kW\*hour), predicted by the Random Forests algorithm based on the data obtained in the period 2006–2008 years. Axis X – hours of day. Axis Y – the amount on the wholesale market.

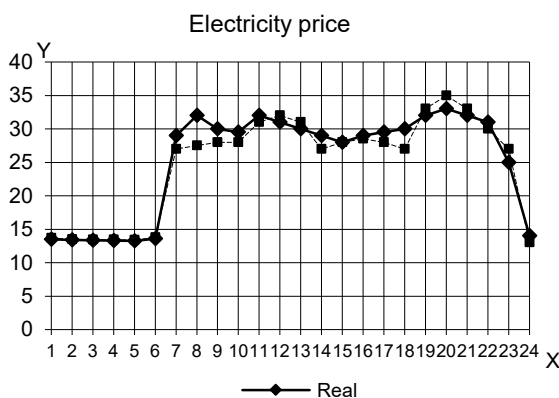


Figure 4 – Forecast of the Random Forests algorithm to determine the price per day

List of acronyms used in the tab. 2:

- RF – The Random Forests algorithm;
- REG – Algorithm of linear regression;
- MMBTU – British Thermal Unit;
- GDP – Gross domestic product.

Consequently, the mean square error, relative average error and absolute average error in the Random Forests algorithm is less than in the linear regression algorithm and can be verified that the Random Forests algorithm has given more precise metrics.

The MSE of the regression algorithm for tab. 2 using formula (1):

$$m_{REG} \approx \sqrt{\frac{874.45}{24}} \approx \sqrt{36.43} \approx 6.03.$$

The MSE of the Random Forests algorithm for tab. 2

$$m_{RF} \approx \sqrt{\frac{117.44}{24}} \approx \sqrt{4.89} \approx 2.2.$$

We have again

$$m_{RF} < m_{REG}.$$

The relative average and absolute mean errors for Linear Regression were calculated by formulas (2)–(3):

$$\varepsilon_{\text{av. rel. err. REG}} = \frac{16.26}{7} \approx 15.3,$$

$$\Delta'_{\text{av. abs. err. REG}} = \frac{96.2}{7} \approx 4.3.$$

The relative average and absolute mean errors for Random Forests were calculated:

$$\varepsilon_{\text{av. rel. err. RF}} = \frac{6.72}{7} \approx 6.46,$$

$$\Delta'_{\text{av. abs. err. RF}} = \frac{39.1}{7} \approx 1.84.$$

According to the results, the Random Forests algorithm and in the forecast for the wholesale price gave better performance than regression.

**Conclusions.** This work has been attempted to analyze of the one of the of Machine learning algorithms, which is used to predict the demand for electricity.

Prediction of Electricity demand is a complex task, a lot of factors play a key role, which are very difficult to consider. The Random Forests algorithm is really well suited for solving prediction problems. The main difficulty when working with the algorithm is to search for relevant historical data that will affect the course of the forecast. The calculated results showed that the standard prediction algorithms based on regression gave less accuracy in comparison with Random Forests algorithm. However, in order to improve the accuracy of the algorithm, a large statistic of historical data were required, based on which the algorithm will carry out training. It should also be noted that all algorithms of machine learning have the so-called shortcoming as a retraining, when some data may become irrelevant to reality and will only worsen the accuracy of the forecast. Here you should promptly detect such data and remove them from a training set.

#### References

1. Шумилова Г. П., Готман Н. Е., Старцева Т. Б. Прогнозирование активной и реактивной нагрузки узлов ЭЭС с использованием инверсии искусственной нейронной сети. *Управление электроэнергетическими системами – новые технологии и рынок: Сб. науч. тр.* Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2004. С. 115–122.
2. Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Ван Ефэн. Прогнозирование электропотребления на основе метода опорных векторов с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации. *Электронный научный журнал. Современные проблемы науки и образования.* 2013, № 2. URL: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua> (accessed: 16.04.2018).
3. Шумилова Г. П., Готман Н. Е., Старцева Т. Б. Прогнозирование электрических нагрузок ЭЭС с использованием методов искусственного интеллекта. *РНЭЭ, 10–14 сентября 2001: Материалы докладов. Т. II.* Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2001. С.103–106.
4. Breiman Leo, Friedman Jerome, Stone Charles J. Olshen R. A. *Classification and regression trees.* Wadsworth and Brooks, CA, 1984. 368 p.
5. *Support Vector Machines (SVM) Introductory Overview.* URL: <http://www.statsoft.com/Textbook/Support-Vector-Machines> (accessed: 16.04.2018).
6. Новотарський М. А., Нестеренко Б. Б. *Штучні нейронні мережі: обчислення.* Київ: Інститут математики НАН України, 2004.

- 408 с. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka\\_trudy/ShtuchnN\\_ejronMeregNester2004.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/ShtuchnN_ejronMeregNester2004.pdf) (accessed: 16.04.2018).
7. Breiman Leo. Random Forests. *Machine Learning.* 2001. Т. 45, № 1. P. 5–32.
8. Tin Kam Ho. Random Decision Forest. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document 8. Analysis and Recognition.* Montreal, QC, 1995. P. 278–282.
9. Ishwaran H. *The Effect of Splitting on Random Forests.* URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5599182/> (accessed: 16.04.2018).
10. *MLlib is Apache Spark's scalable machine learning library.* URL: <https://spark.apache.org/mllib/> (accessed: 16.04.2018).
11. *Data Types – RDD-based API.* URL: <https://spark.apache.org/docs/2.0.2/mllib-data-types.html> (accessed: 16.04.2018).
12. *Weather archive in Kharkiv.* URL: [https://rp5.ru/Weather\\_archive\\_in\\_Kharkiv\\_\(airport\)](https://rp5.ru/Weather_archive_in_Kharkiv_(airport)) (accessed: 16.04.2018).
13. *Аналіз роботи ОЕС України по місяцям.* URL: <http://www.er.gov.ua/doc.php?c=24> (accessed: 16.04.2018).
14. *Динамика цены на природный газ.* URL: <https://www.calc.ru/dinamika-Gas.html> (accessed: 16.04.2018).
15. *Отраслевой обзор. Уголь Украины.* URL: [http://www.bakertilly.ua/media/Baker%20Tilly%20-%20Report\\_coal\\_industry\\_rus.pdf](http://www.bakertilly.ua/media/Baker%20Tilly%20-%20Report_coal_industry_rus.pdf) (accessed: 16.04.2018).
16. *Курсы валют (доллар, евро) в 2008 году.* URL: <https://www.kurs.metrinfo.ru/kurs/> (accessed: 16.04.2018).
17. *Валовой внутренний продукт.* URL: <https://index.minfin.com.ua/economy/gdp/> (accessed: 16.04.2018).
18. *Ukraine – Gross domestic product per capita in current prices.* URL: [https://knoema.com/atlas/Ukraine/GDP-per-capita?origin=knoema.ru&\\_ga=2.86031384.1897352500.1528129995-423093515.1528129995](https://knoema.com/atlas/Ukraine/GDP-per-capita?origin=knoema.ru&_ga=2.86031384.1897352500.1528129995-423093515.1528129995) (accessed: 16.04.2018).
19. *Прямые иностранные инвестиции.* URL: <https://index.minfin.com.ua/index/fdi/> (accessed: 16.04.2018).

#### References (transliterated)

1. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startseva T. B. Prediction of active and reactive load nodes EPS using an artificial neural network inversion [Prognozirovaniye aktivnoy i reaktivnoy nagruzki uzlov EES s ispolzovaniyem inversii iskusstvennoy neyronnoy seti]. *Upravleniye elektroenergeticheskimi sistemami – novyye tekhnologii i rynek: Sb. nauch. tr.* [Power systems management – new technologies and market: Collection of scientific papers]. Syktyvkar, Komi NTs UrO RAN, 2004, pp. 115–122.
2. Polyakhov N. D., Prikhodko I. A., Van Ye. Forecasting electricity consumption based on support vector using evolutionary optimization algorithms [Prognozirovaniye elektropotrebleniya na osnove metoda opornykh vektorov s ispolzovaniyem evolyutsionnykh algoritmov optimizatsii]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Electronic scientific journal. Modern problems of science and education], 2013, no.2.
3. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startseva T. B. Prediction of electrical loads using artificial intelligence techniques [Prognozirovaniye elektricheskikh nagruzok s primeneniym metodov iskusstvennogo intellekta]. *RNSE, 10–14 sentyabrya 2001: Materialy докладов* [RNEE, September 10–14, 2001: Material of the reports]. Available at: <http://www.energy.komisc.ru/seminar/StShum1.pdf> (accessed 16.04.2018).
4. Breiman Leo, Friedman Jerome, Stone Charles J. Olshen R. A. *Classification and regression trees.* Monterey, CA: Wadsworth & Brooks, 1984.368 p.
5. *Support Vector Machines (SVM) Introductory Overview.* Available at: <http://www.statsoft.com/Textbook/Support-Vector-Machines>, (accessed: 16.04.2018).
6. Novatorskiy M. A., Nesterenko B. B. *Shtuchni neyronni merezhi: obchislennya* [Artificial Neural Networks: calculation]. Kiev, Instytut matematyky NAN Ukrai'ny Publ., 2004.408 p. Available at: [http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka\\_trudy/ShtuchnN\\_ejronMeregNester2004.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/ShtuchnN_ejronMeregNester2004.pdf) (accessed: 16.04.2018).
7. Breiman Leo. Random Forests. *Machine Learning.* 2001,vol. 45, no 1, pp. 5–32.

8. Tin Kam Ho. Random Decision Forest. *Proceedings of the 3rd International Conference on Document 8. Analysis and Recognition*. Montreal, QC, 1995, pp. 278–2826.
9. Ishwaran Hemant. *The effect of splitting Random Forest*. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5599182/> (accessed 16.04.2018).
10. *MLlib is Apache Spark's scalable machine learning library*. Available at: <https://spark.apache.org/mllib/> (accessed: 16.04.2018).
11. *Data Types – RDD-based API*. Available at: <https://spark.apache.org/docs/2.0.2/mllib-data-types.html> (accessed: 16.04.2018).
12. *Weather archive in Kharkiv*. Available at: [https://tp5.ru/Weather\\_archive\\_in\\_Kharkiv\\_\(airport\)](https://tp5.ru/Weather_archive_in_Kharkiv_(airport)) (accessed: 16.04.2018).
13. *Analiz roboty OES Ukrainy po misiatsiam* [Analysis of the work of the OES of Ukraine by months]. Available at: <http://www.er.gov.ua/doc.php?c=24> (accessed: 16.04.2018).
14. *Dinamika tseny na prirodnyy gaz* [The dynamics of prices for natural gas]. Available at: <https://www.calc.ru/dinamika-Gas.html> (accessed: 16.04.2018).
15. *Otraslevoy obzor. Ugol Ukrainyi* [Industry review. Coal of Ukraine]. Available at: [http://www.bakertilly.ua/media/Baker%20Tilly%20-%20Report\\_coal\\_industry\\_rus.pdf](http://www.bakertilly.ua/media/Baker%20Tilly%20-%20Report_coal_industry_rus.pdf) (accessed: 16.04.2018).
16. *Kursyi valyut (dollar, evro) v 2008 godu* [Exchange rates (dollar, euro) in 2008]. Available at: <https://www.kurs.metinfo.ru/kurs/2008-1-3/#start> (accessed: 16.04.2018).
17. *Valovoy vnutrenniy produkt* [Gross domestic product]. Available at: <https://index.minfin.com.ua/economy/gdp/> (accessed: 16.04.2018).
18. *Ukraine – Gross domestic product per capita in current prices*. Available at: [https://knoema.com/atlas/Ukraine/GDP-per-capita?origin=knoema.ru&\\_ga=2.86031384.1897352500.1528129995-423093515.1528129995](https://knoema.com/atlas/Ukraine/GDP-per-capita?origin=knoema.ru&_ga=2.86031384.1897352500.1528129995-423093515.1528129995) (accessed: 16.04.2018).
19. *Pryamyie inostrannyye investitsii* [Direct Foreign investments]. Available at: <https://index.minfin.com.ua/index/fdi/> (accessed: 16.04.2018).

Received 27.04.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шевченко Сергій Васильович (Шевченко Сергей Васильевич, Shevchenko Serhiy Vasylyovych)** – кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3831-5425>; e-mail: [sv-shevchenko@ukr.net](mailto:sv-shevchenko@ukr.net).

**Друппов Дмитро Олександрович (Друппов Дмитрий Александрович, Drupnov Dmytro Oleksandrovych)** – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1318-0325>; e-mail: [dmitry.drupnov@gmail.com](mailto:dmitry.drupnov@gmail.com)

**Безменов Микола Іванович (Безменов Николай Иванович, Bezmenov Mykola Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, професор НТУ «ХПІ», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-2350>; e-mail: [bezmenov@kpi.kharkov.ua](mailto:bezmenov@kpi.kharkov.ua)

**O. I. ZINKOVSKIY, R. O. GAMZAYEV, A. BOLLIN, M. V. TKACHUK**

### **A FUZZY-BASED APPROACH TO AUTOMATED DEFECT IDENTIFICATION IN DISTRIBUTED SOFTWARE SYSTEMS AND SOFTWARE PRODUCT LINES**

An approach to the improvement of the efficiency of the bug tracking process in distributed software systems and software product lines via automated identification of duplicate report groups and report groups collected from correlated bugs, combined with bug localization within a software product line is considered. A brief overview of the problem of automated report collection and aggregation is made, several existing software tools and solutions for report management and analysis are reviewed, and basic functionality of a typical report management system is identified. In addition to this, a concept of a report correlation group is introduced and an automated crash report aggregation method based on the rules for comparison of crash signatures, top frames, and frequent closed ordered sub-sets of frames of crash reports is proposed. To evaluate these rules, two separate fuzzy models are built, the first one to calculate the output of the Frequent Closed Ordered Sub-Set Comparison rule, and the second one to interpret and combine the output of all three rules and produce an integrated degree of crash report's similarity to an existing report correlation group or to another report. A prototype of a report management system with report aggregation capabilities is developed and tested using imported from the publicly available Mozilla Crash Stats project report groups. During the experiment, a precision of 90% and a recall of 81% are achieved. Lastly, an approach to localize the largest identified report groups and represented by them bugs within a concrete software product line based on an information basis consisting of a feature model, a list of software components, and a mapping between features and components is proposed, conclusions are drawn, and goals for the future work are outlined.

**Keywords:** crash reports, automated crash report collection and aggregation, bug localization, fuzzy logic, distributed software systems, software product lines, Mozilla Crash Stats project, Socorro, report management system, bug tracking.

### **О. І. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, Р. О. ГАМЗАЄВ, А. БОЛЛІН, М. В. ТКАЧУК ПІДХІД З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДО АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ В РОЗПОДІЛЕНИХ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМАХ ТА ЛІНІЙКАХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ**

Розглянуто підхід до підвищення ефективності процесу відстеження помилок в розподілених програмних системах та лінійках програмних продуктів шляхом автоматизованої ідентифікації дубльованих груп звітів та груп звітів, зібраних з корельованих помилок, у поєднанні з локалізацією помилок серед компонентів лінійок програмних продуктів. Зроблено короткий огляд проблеми автоматизованого збору та агрегації звітів, розглянуто кілька існуючих програмних засобів для аналізу звітів, а також визначено основні функціональні можливості типової системи управління звітами. Крім того, запропоновано концепцію кореляційної групи звітів та наведено автоматизований метод агрегації звітів, який базується на правилах порівняння підписів звітів, верхньої форми звітів, та трасувальних стеків звітів про збої. Для оцінки цих правил будуються дві окремі нечіткі моделі – перша для розрахунку результату правила порівняння трасувальних стеків звітів, а друга – для інтерпретації та поєднання результатів усіх трьох правил і створення інтегрованого ступеня подібності звіту про збій з існуючою кореляційною групою звітів або іншим звітом. За допомогою імпорту груп звітів з загальнодоступного репозиторію Mozilla, тестується розроблений прототип системи управління та агрегації звітів. Під час експерименту досягається точність в 90% і повнота в 81%. Нарешті, пропонується підхід до локалізації найбільших ідентифікованих груп звітів та представлених ними помилок у лінійці програмних продуктів на основі інформаційної бази, що складається з функціональної моделі, списку програмних компонентів та взаємозв'язків між функціями та компонентами, робляться висновки та визначаються цілі для подальшої роботи.

**Ключові слова:** звіти про збої, автоматизований збір та агрегація звітів, локалізація дефектів, нечітка логіка, розподілені програмні системи, лінійки програмних продуктів, проект Mozilla Crash Stats, Socorro, система управління звітами, відстеження помилок.

### **А. И. ЗИНЬКОВСКИЙ, Р. А. ГАМЗАЕВ, А. БОЛЛИН, Н. В. ТКАЧУК ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМАХ И ЛИНЕЙКАХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ**

Рассмотрен подход к повышению эффективности процесса отслеживания ошибок в распределенных программных системах и линейках программных продуктов путем автоматизированной идентификации дублированных групп отчетов и групп отчетов, собранных с коррелированных ошибок, в сочетании с локализацией ошибок среди компонентов линеек программных продуктов. Сделан краткий обзор проблемы автоматизированного сбора и агрегации отчетов, рассмотрены несколько существующих программных средств для анализа отчетов, а также определены основные функциональные возможности типовой системы управления отчетами. Кроме того, предложена концепция корреляционной группы отчетов и приведен автоматизированный метод агрегации отчетов, основанный на правилах сравнения подписей отчетов, верхней формы отчетов, и трассировочных стеков отчетов о сбоях. Для оценки этих правил строятся две отдельные нечеткие модели - первая для расчета результата правила сравнения трассировочных стеков отчетов, а вторая - для интерпретации и сочетания результатов всех трех правил и создания интегрированного показателя степени сходства отчета о сбое с существующей корреляционной группой отчетов или иным отчетом. С помощью импорта групп отчетов с общедоступного репозитория Mozilla, тестируется разработанный прототип системы управления и агрегации отчетов. Во время эксперимента достигается точность в 90% и полнота в 81%. Наконец, предлагается подход к локализации крупнейших идентифицированных групп отчетов и представленных ими ошибок в линейке программных продуктов на основе информационной базы, состоящей из функциональной модели, списка программных компонентов и взаимосвязей между функциями и компонентами, делаются выводы и определяются цели для дальнейшей работы.

**Ключевые слова:** отчеты о сбоях, автоматизированный сбор и агрегация отчетов, локализация дефектов, нечеткая логика, распределенные программные системы, линейки программных продуктов, проект Mozilla Crash Stats, Socorro, система управления отчетами, отслеживание ошибок.

**Introduction: Problem Actuality and Research Goal.** Software defects (also known as bugs or issues) occur in any type of software development process, and,

depending on the type, both the number of defects present in the system as well as the time it takes to detect them can vary greatly [1].

© O. I. Zinkovskiy, R. O. Gamzayev, A. Bollin, M. V. Tkachuk, 2018

While most bugs can be discovered via in-house testing, there are always issues that will be detected only in the production environment by customers and actual users of the system. Since the amount of errors present in the system is never precisely known, it is impossible to accurately estimate the time and effort it will take to fix them. In extreme cases, tracking down and fixing bugs can take up as much as 80 % of project's financial costs [1]. In principle, it is impossible to guarantee that the program is 100 % correct. The general rule is that the larger and more complex a system is, the higher is the number of bugs.

Bug reports are crucial to identifying and solving problems in an efficient and robust manner. It has been observed that the more detailed the bug reports are, the faster developers will be able to fix the bug [2]. In many cases upon encountering a bug or a crash, users are expected to go to a dedicated forum and fill out a bug reporting form where they provide all necessary information and stack traces from their locally stored logs. Stack traces, system information, steps to reproduce the bug, user comments, and other information help developers reproduce and fix reported bugs by tracking their origin. However, not all users report bugs they've encountered, and for many it is simply too bothersome to manually provide the crucial technical information.

To ensure that developers get all necessary information needed to effectively fix bugs, many modern software products are shipped with embedded problem reporting tools. These tools automatically record and submit bug reports, with very little to no effort on the user's part. The most famous automated crash reporting system is the Windows Error Reporting system by Microsoft, which was found to be 5 times more efficient in helping fix bugs than reports submitted manually by a human [3].

However, embedded problem reporting tools are difficult and costly to implement, and the amount of data they collect can be challenging to analyze even for a small project. For example, Mozilla on average receives 96 million crash reports per month; they outnumber bug reports by more than 20,000: 1. Furthermore, 88.19 % of crash reports and 24.7 % of bug reports submitted to Mozilla are marked as duplicate [4].

Therefore, to make it easier to work with collected crash reports, most problem reporting tools aggregate the received reports according to a set of pre-defined rules. Many approaches to aggregation of crash reports were proposed, however, crash report aggregation in distributed software systems remains a non-trivial task. This is mainly because, depending on the usage scenario, a bug may cause multiple failures and crashes in several different modules at once, thus propagating its influence across the system and making the root cause of the defect harder to find.

A software product line (SPL) is a set of software-intensive systems that share a common, managed set of features satisfying the specific needs of a particular market segment or mission and that are developed from a common set of core assets in a prescribed way [5]. In other words, an SPL is a family of related programs that are differentiated by a unique combination of features,

which represent increments in functionality. There exist many modeling languages for SPL design, among which are FODA, FORM, FeatuRSEB, PLUS, ODM and FAST [6].

In addition to the main issues inherent to testing and support of distributed software systems, SPLs present a different challenge, wherein a bug in each type of SPL components (core, configurable, and custom) needs to be handled in its own way within the concrete product and sometimes even the entire SPL. Furthermore, some reports collected during testing may be caused not by an actual bug in the code, but rather an incorrect configuration of the product (i.e. illegal combination of features) or errors inside the tests themselves. As such, this type of errors should be identified and dealt with separately.

In this paper, a brief overview of existing tools and solutions is given and, as no available product is found satisfactory, a method for automated crash report aggregation (ACRA) based on a combination of 3 simple rules and fuzzy logic is proposed. Furthermore, an approach to bug localization within an SPL is outlined. The objective of this combined approach is to help developers of distributed systems and SPLs to identify bugs as well as their scope and origin in a more efficient way.

**Overview of existing approaches.** Built-in crash reporting tools usually collect large amounts of data, which can be extremely helpful in identifying and localizing software defects. As the number of submitted reports grows, manual analysis of each bug report quickly becomes inefficient and in most cases downright impossible. However, even automated processing of large volumes of data gathered by popular software products oftentimes presents unique challenges and harsh demands on processing power, network bandwidth, and storage facilities. While high demand for network bandwidth is unlikely to ever be solved, many attempts have been made to mitigate and reduce the impact of the other two issues.

There exist several strategies that are commonly used to reduce the load associated with analysis of a large amount of crash reports, namely:

- Biased sampling – with so many reports it isn't always possible to process or display all of them. Companies like Mozilla only process a sample of 10 % out of their 96 million monthly crash reports [4]. This sample is randomized, but biased towards reports with user-provided details;

- Removal of duplicates – once a report has been identified as a duplicate of a previously submitted report, it is deleted and a special counter for the number of times the issue has been encountered is updated. Out of the 10 % sample Mozilla takes, using fuzzy matching techniques 88.19 % of reports [4] are classified as duplicate and are subsequently reduced;

- Report aggregation according to contained stack traces, failing method, or other technical information. This is usually the last step that is primarily aimed at the detection of the remaining correlated and duplicate reports.

The combination of these 3 methods helps save time and processing power for search, filter and other analytical

functions, as well as greatly reduces the required storage space. However, most of the existing solutions use relatively simple and easy to implement algorithms, and while such approach is fast and doesn't require a lot of processing power, much like Mozilla's solution it usually can't find all correlations present in the data [7].

There are built-in and standalone tools for log collection and analysis available for almost any programming language and platform, some focusing primarily on the collection and filtering aspect, while others are better at report analysis and dynamic aggregation. Fig. 1 summarizes the basic functionality required by a typical automated report management system. However, none of the tools we looked at implement the full list.

For example, Graylog [8], an enterprise solution for storing, accessing, and analyzing log data, allows for convenient log and report storage, visual representation, and search, but lacks in flexible aggregation. The tool has very limited ability to detect related logs, provided they aren't clear duplicates. For more advanced aggregation and clustering capabilities, users must install a plugin [9] and write their own explicit rules, resulting in a poorly generalized and constricted system with no ability to implement complex clustering or aggregation logic.

Sentry [10], a tool for collecting JavaScript user logs, exceeds in capturing an unprecedented level of information about JavaScript execution and its environment, but fails to provide a sufficiently customizable and flexible aggregation framework, forcing developers to implement workarounds in their code to integrate and expand its functions beyond the default feature set.

Both Android [11, 12] and iOS [13] platforms offer built-in tools for error and performance log collection, while their respective development environments and online platforms provide a convenient way of accessing all collected logs and viewing general statistics about the published applications. Furthermore, advanced functionality that is missing by default is oftentimes provided by third-party solutions [14, 15].

The only product that appears to be handling the

issue of duplicate reports and correlated bugs in a configurable and robust way is Crashlytics [15]. The downside is that Crashlytics supports only mobile development (both Android and iOS), and, just like all other reviewed products, doesn't have the necessary tools to deal with SPL testing and support.

To summarize, while popular and efficient, the reviewed solutions for issue collection offer little in the way of intelligent report aggregation, most systems relying solely on stack trace analysis. In contrast to this, systems with complex aggregation and analysis capabilities are rare and usually require a complicated setup process and use of a separate tool for issue collection and even storage. Furthermore, none of the reviewed applications had the necessary tools and flexibility for dealing with SPLs.

**The aim and benefits of automated defect identification.** In most cases developers will prioritize bugs that occur frequently for a large percent of their user base. However, because a bug can lead to a variety of crashes under different usage scenarios, multiple report groups are sometimes related to the same bug, which makes the evaluation of bug and crash severity harder. We refer to a set of report groups related to the same bug as duplicate report groups. Furthermore, there are cases when an occurrence of one bug causes the other bug to occur. This is known as correlated bugs, and in such cases both bugs and every related to them report group needs to be analyzed, evaluated, and used together to fix the issue. We refer to all report groups pertaining to a bug as well as any report groups collected from its correlated bugs as a report correlation group (RCG). A schematic overview of an RCG is presented in Fig. 2.

Crash reports usually contain method signature, stack trace of the failing thread, crash time, information about runtime environment, and optionally user comments and attachments regarding the crash. These reports are aggregated into RCGs according to their similarity. The obtained groups are then ranked according to their report counts (i.e. frequency of crash occurrence) and bug item entries are created for the top RCGs.

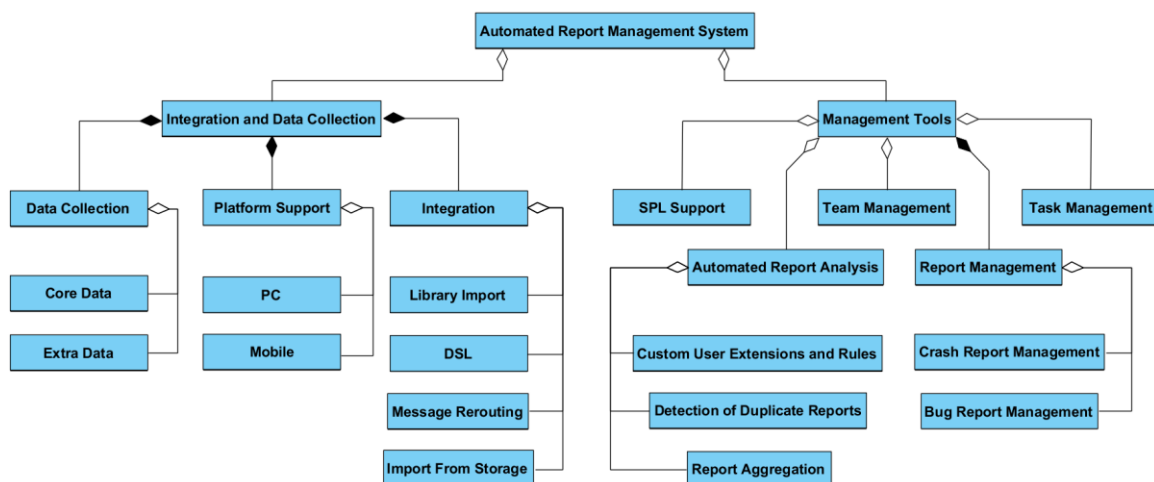


Fig. 1. Basic functionality of automated report management systems

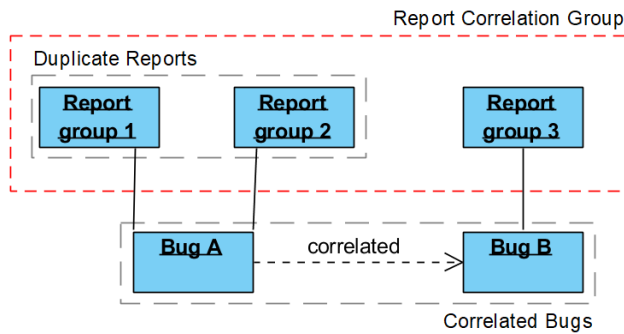


Fig. 2. Report correlation group (RCG)

Identification of RCGs (and therefore duplicate crash reports and correlated bugs) on the early stages of the debugging process can help developers fix existing correlated bugs together, as well as increase the overall speed and efficiency of the debugging process. It has been suggested that by analyzing and comparing a set of correlated bug reports, it becomes easier to track the root cause of the bug, especially in complex distributed systems and SPLs [2].

Identification of RCGs and, subsequently, bugs they represent can also help development teams to better manage their resources. One such example could be increasing the priority of correlated bugs or assigning more experienced developers to fix them. Furthermore, as crash reports are continuously submitted until the underlying bug that causes crashes is fixed, by quickly and efficiently eliminating the bug development teams can reduce the amount of crash reports they receive and, therefore, hardware and human demands associated with crash report storage and processing.

**A fuzzy-based integrated approach to automated crash report aggregation (ACRA).** To better identify duplicated and correlated crash reports, first we need to establish several definitions.

A stack trace is an ordered set of frames ( $F_i$ ), each frame consisting of a method signature ( $methSign$ ) and a fully qualified file name ( $qFileName$ ).  $F_i = methSign_i | qFileName_i$ , where  $i \in \{1 \dots n\}$  is the position of frame  $F_i$  in a stack trace of a total frame length  $n$ . Usually all reports belonging to a report group will have at least one identical frame. We refer to the top frame common to all stack traces of a report group as the top frame of the report group. The frames after it may be identical or vary across the group, but the method signature of the top frame is always used as part of the report group signature. An example stack trace is shown in Fig. 3.

Frame	Module	Signature	Source	Top Frame
0	libmozglue.dylib	mozalloc_abort	<a href="#">memory/mozalloc/mozalloc_abort.cpp:34</a>	✓
1	libmozglue.dylib	abort	<a href="#">memory/mozalloc/mozalloc_abort.cpp:81</a>	
2	XUL	std::panicking::rust_panic	<a href="#">src/libpanic_abort/lib.rs:59</a>	

Fig. 3. Example of Stack Trace from Firefox

A report group signature  $S$  may be represented as  $S = P_1 | P_2 | \dots | P_n$ , where each element  $P_i$  in turn consists of  $\langle File \rangle \langle Operator \rangle \langle Method \rangle \langle Parameter \rangle \langle$

*Memory Location*  $\rangle$ . In a report group signature, at least one  $P_i$  should not be NULL.  $P_i$  can't be formed using only the name of an operator, which depends on the programming language and signature composition. Furthermore, attributes like *File*, *Operator*, *Method*, and *Parameter* can be NULL. For example, the Mozilla's report group signature for the above stack trace is "mozalloc\_abort | abort | core::option::expect\_failed".

A contains relation between signature elements  $P$  of a report group  $S = P_1 | P_2 | \dots | P_n$  is defined as if  $(file_i = file_j) \wedge \{op_i, meth_i, param_i\} \subseteq \{op_j, meth_j, param_j\}$ , then  $P_j$  contains  $P_i$ .

Building on top of this, a binary relation  $\subset$  on the set of all RCG signatures  $S$  is defined as  $S_A \subset S_B$  if  $\forall P_i^A, i \in \{1 \dots n\}, \exists j \in \{1 \dots m\} | P_j^B \text{ contains } P_i^A$ .

As the basis for the ACRA method we used 3 rules suggested earlier by Shaohua Wang et al. [19], namely:

1. Crash Signature Comparison. Given two report groups  $RG_A$  and  $RG_B$  with corresponding signatures  $S_A$  and  $S_B$ ,  $RG_A$  and  $RG_B$  are correlated if  $S_A \subset S_B$  or  $S_B \subset S_A$ . This is the least resource-demanding rule. It is aimed at determining correlations by investigating the similarity of report group signatures. An example of this rule is signatures "nsDiskCacheStreamIO::FlushBufferToFile()" and "Strstr|nsDiskCacheStreamIO::FlushBufferToFile", which differ only slightly and, therefore, are correlated.

2. Top Frame Comparison. Given two report groups  $RG_A$  and  $RG_B$  with top frames  $F_1^A$  and  $F_1^B$ ,  $RG_A$  and  $RG_B$  are correlated if  $qFileName_1^A = qFileName_1^B$ . During comparison of fully qualified file names ( $qFileName$ ), all file extensions are removed. This rule is aimed at a more detailed analysis of stack traces, in this case their source code paths. Much like the previous rule, it analyses and compares only the top frame of stack traces.

3. Frequent Closed Ordered Sub-Set Comparison. This rule is an extension of the previous rule, namely it is aimed at analyzing fully qualified file names of all frames, not just the top frame. A notion of relative support of the rule is introduced, wherein *relative support* = *number of shared frames / total number of frames*. Only the identical and longest set of frames with the relative support of greater or equal to 0.5 is called the frequent closed ordered sub-set of frames. Furthermore, the distance of the top frequent closed ordered frame to  $F_0$  is also considered during the final evaluation of the rules.

Wang et al. [16] evaluated each of these rules separately, with report groups considered to be correlated if at least one of the 3 rules provided a positive result. In this paper, we propose a fuzzy-based integrated approach to automated crash report aggregation (ACRA). Namely, we use fuzzy logic to evaluate the combined output of these rules and compute the degree of report's similarity (i.e. membership) to other reports or report groups.

Furthermore, contrary to the approach to evaluation of the Frequent Closed Ordered Sub-Set Comparison rule employed by Wang et al. [16], we use a separate fuzzy model to calculate the degree of report's similarity based on the length of the common frame sequence as well as its distance to the top frame of the stack trace.

The ACRA method proposed in this paper relies on

the use of a fuzzy model to compute the final degree of report’s membership to a given group, or alternatively the degree of correlation between two report groups. As its input, the model takes values received from the rules, and by applying weight coefficients and a threshold function produces the degree of report’s membership.

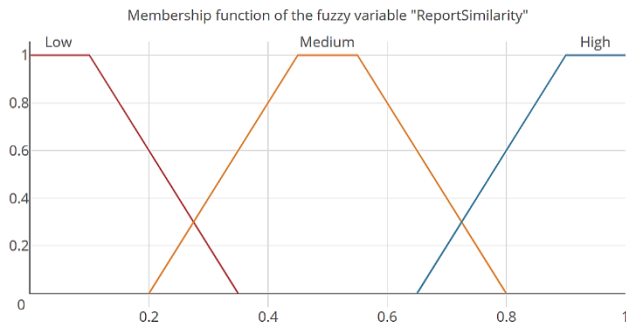


Fig. 4. Membership function of  $\beta$  = “ReportSimilarity”

A linguistic variable is a set of  $\langle \beta, T, X, G, \mu \rangle$ , where  $\beta$  is the name of the fuzzy variable,  $T$  is a set of terms (fuzzy values) of the variable,  $X$  is a fuzzy set that describes the so called “base values” of the term,  $G$  is a set of syntax rules that define the elements of  $T$  (it is possible for  $G$  to be empty, i.e.  $G = 0$ ), and  $\mu$  is the membership function that maps base values to the terms contained in  $T$ .

According to the above definition, the fuzzy variable *ReportSimilarity*, which represents the combined degree of the similarity between two reports or a report and a report group, is defined as  $\beta = \text{“ReportSimilarity”}$ ,  $T = \langle \text{“low”, “medium”, “high”} \rangle$ ,  $X = [0-1]$ . The membership function  $\mu_\beta$  is shown in Fig. 4.

**Experimental results.** To assess ACRA’s performance in identification of duplicate and correlated crash reports, an experiment was performed. A prototype report management system was developed and tested on a pre-downloaded and verified data set. The data set for analysis was obtained from the Socorro server, which is maintained as part of the open to public Mozilla Crash Stats (MCS) project. A statistical comparison of the number of RCGs created by the MCS project and the prototype ACRA system was performed, and its results are presented in Table 1 and in Fig. 5 and 6. Fig. 5 shows the amount of reports ACRA and MCS correctly aggregated for the top 10 control groups (the closer to the control line, the better the result), while Fig. 6 compares their precision and recall.

Reports relating to the newest stable version of Mozilla Firefox were imported and analyzed.

A set of 426 reports separated by MCS into 34 RCGs has been selected, with the resulting set being biased towards duplicate groups that weren’t correctly aggregated by MCS. To evaluate the performance of the ACRA method, the report groups provided by MCS were taken as an etalon (i.e. MCS precision = 100 %), however their relationships were analyzed and duplicate groups were found via analysis of the related Bugzilla bug IDs provided by Mozilla developers for any sufficiently large crash report group. More specifically, 21 etalon RCGs

were identified and used as a control sample for the experiment.

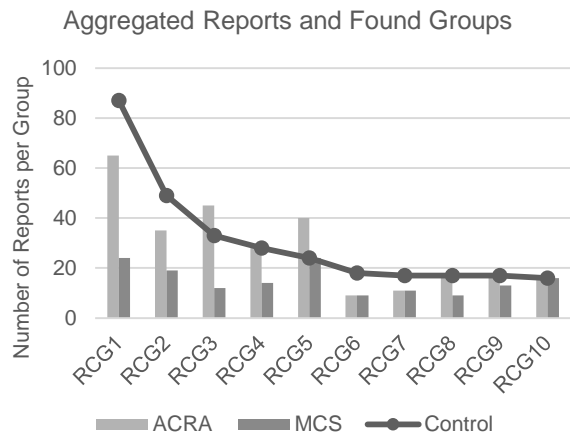


Fig. 5. Aggregated reports for the top 10 correct RCGs

Analysis of the imported from MCS report groups showed that the top 21 groups contained 267 aggregated reports, which is 62 % of all reports in the data set. Contrary to this, the top 21 groups created by ACRA contained 383 reports, albeit 38 of them (10 %) were assigned erroneously, which results in 345 correctly aggregated reports, or 81 % of the total number. In general, compared to the 21 etalon groups, 34 groups were created by Mozilla, whereas ACRA created only 25 groups, a result achieved by a more thorough and in-depth analysis of the structure and contents of crash reports.

Table 1 – Results of the experiment

	MCS	ACRA
Aggregated correctly	267 reports, 62 %	345 reports, 81 %
Created RCGs	34/21	25/21
Deleted reports	N/A	83 reports, 18 %

Using the metrics of information retrieval, precision and recall values were calculated in the following way:

$$precision = \frac{| \{correctRCGs\} \cap \{retrievedRCGs\} |}{| \{retrievedRCGs\} |},$$

$$recall = \frac{| \{correctRCGs\} \cap \{retrievedRCGs\} |}{| \{correctRCGs\} |}.$$

Precision reflects the fraction of created report groups that are correct, while recall indicates the overall fraction of correct report groups that were found.

Using crash reports obtained from the Socorro server, a precision rate of 90 % and a recall of 81 % were achieved. The obtained recall value is significantly higher than the 62 % recall of the MCS project.

A statistical analysis of the duplicate report removal feature (reports with similarity of above 0.95 %) showed that 18 % of the previously thought to be unique reports could be reduced to free up the storage space of the



system, a noticeable improvement for enterprise-grade products.

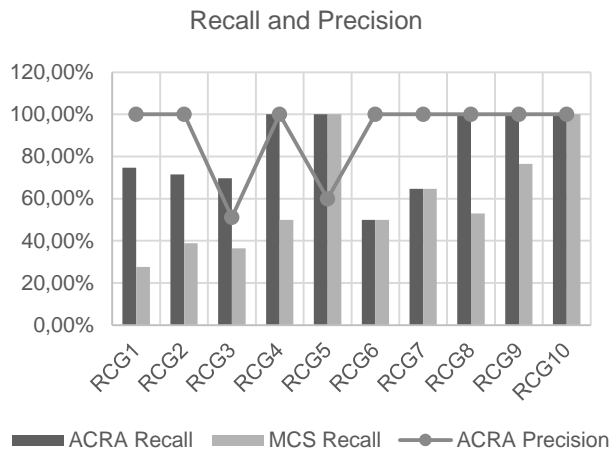


Fig. 6. Recall and precision for the top 10 correct RCGs

The identification of RCGs allows developers to access the groups of related crash reports and information contained within them. Working with RCGs instead of separate crash reports can help identify and track the underlying cause of the crash faster, thus decreasing the time it takes to debug and fix an error [2]. Furthermore, it has been observed that identification of RCGs can significantly increase the overall efficiency of the work associated with debugging of certain types of bugs [4].

**Bug localization approach within an SPL.** Feature models play a key role in testing of SPLs as they constrain the space of products to test and enable accurate categorization of failing tests as failures of programs or the tests themselves, not as failures due to illegal configurations [5]. Consequently, testing of SPLs while ignoring such dependencies is senseless.

As part of our future work, to enable traceability between collected crash reports and features (software components) of an SPL, we propose the following operating model (OM) [17] for crash report localization (CRL). The CRL OM can be represented as a tuple:

$$OM(CRL) = \langle InfBasis, ProcAlgorithm, Metrics \rangle.$$

*InfBasis* should be built separately for each SPL product. It consists from a valid feature model of the SPL, a list of software artifacts (product components) belonging to each SPL product, a mapping between components and features, and a list of unprocessed crash reports. *ProcAlgorithm* represents an expanded ACRA fuzzy logic method that is responsible for using the technical information present inside crash reports (mainly stack traces and method signatures) to aggregate reports into RCGs and establish to what type of SPL components these groups belong. *Metrics* measure and provide statistics on types of failures and their counts for various SPL components and features, as well as reflect how reliable the work of *ProcAlgorithm* is.

With the help of this OM, it is possible to connect crash reports and implemented SPL components (features) by using the *ProcAlgorithm* and data from the *InfBasis*

to trace sets of crash reports in relation to the implemented software components of an SPL.

In other words, given a valid feature model, a set of existing software artifacts, and mappings between software components and features, it is possible to use the technical information contained inside crash reports to identify the type and name of the component that is most likely responsible for the crash described by an RCG.

**Conclusions and future work.** Based on the results of preliminary tests of the developed prototype ACRA system, the proposed rules for identification of duplicate and correlated crash reports combined with the fuzzy evaluation approach have shown better results than the current solution employed by Mozilla.

By optimizing the underlying fuzzy models and implementing the suggested SPL bug localization technique, a more efficient approach to improvement of the bug tracking process of both distributed systems and SPLs will be obtained. Furthermore, localization of the RCGs identified by the ACRA method in an SPL will allow developers to determine the scope of crashes and corresponding to them bugs in a more efficient manner.

Our future work concerns further testing and improvements of the ACRA method combined with development and testing of a system that will collect crash reports, aggregate them into crash groups using the ACRA method, and (if needed) localize the obtained RCGs within an SPL by using the suggested SPL bug localization approach. Furthermore, we also plan to expand the ACRA method to work with user-submitted bug reports.

## References

1. Sommerville I. Software engineering / Ian Sommerville. – 9th ed. Addison Wesley, 2011. 773 p.
2. Adrian S., Nicolas B., Rahul P. Do stack Traces Help Developers Fix Bugs? *MSR 2010: 7th IEEE Working Conference on Mining Software Repositories*, 2010. P. 118–121.
3. Kinshumann K., Glerum K., Greenberg S., Aul G. et al. Debugging in the (very) large: ten years of implementation and experience. *ACM Communications*. New York City, NY, USA, 2011. № 7, vol. 54. P. 111–116.
4. Iftexhar A., Nitin M., Carlos J. The Impact of Automatic Crash Reports on Bug Triaging and Development in Mozilla. *The 14th International Symposium on Open Collaboration*. Berlin, 2014.
5. *Carnegie Mellon University Software Engineering Institute. Software Product Lines*. URL: <https://www.sei.cmu.edu/productlines> (accessed 11.05.2018).
6. Asmaa A., Ounsa R., Nissrine S., Camille S. Selecting SPL Modeling Languages: a Practical Guide. *The Third World Conference on Complex Systems (WCCS), 2016*. Marrakech, Morocco, November 2015.
7. Tejinder D., Foutse K., Ying Z. Classifying Field Crash Reports for Fixing Bugs: A Case Study of Mozilla Firefox. *The 27th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM)*. Williamsburg, VA, USA, September 2011.
8. *Graylog*. URL: <https://www.graylog.org/overview> (accessed 11.05.2018).
9. *Aggregates Plugin for Graylog*. URL: <https://marketplace.graylog.org/addons/0d01a899-138a-4f77-a9e7-04be4cc5e190> (accessed 11.05.2018).
10. *Sentry*. URL: <https://sentry.io/for/javascript> (accessed 11.05.2018).
11. *Google Play Console*. URL: <https://play.google.com/apps/publish/> (accessed 11.05.2018).
12. *Firebase crash reporting*. URL: <https://firebase.google.com/docs/crash/> (accessed 11.05.2018).
13. *Xcode*. URL: <https://developer.apple.com/xcode/> (accessed 11.05.2018).

14. *Firestore Crashlytics*. URL: <https://firebase.google.com/docs/crashlytics/> (accessed 11.05.2018).
15. *Crashlytics reports*. URL: <http://try.crashlytics.com/reports/> (accessed 11.05.2018).
16. Wang S., Khomh F., Zou Y. Improving bug localization using correlations in crash reports. *The 10th IEEE Working Conference on Mining Software Repositories*. San Francisco, CA, USA, May 2013. P. 247–256.
17. Tkachuk M.V., Abbasov T.F. An operating model for dynamic requirements management in agile software development. *The XXV International Scientific and Practical Conference on Information Technologies MicroCAD-2018*. Kharkiv, May 2018. P.12.

#### References (transliterated)

1. Sommerville I. Software engineering / Ian Sommerville. – 9th ed. Addison Wesley, 2011. 773 p.
2. Adrian S., Nicolas B., Rahul P. Do stack Traces Help Developers Fix Bugs? *MSR 2010: 7th IEEE Working Conference on Mining Software Repositories*, 2010, pp. 118–121.
3. Kinshumann K., Glerum K., Greenberg S., Aul G. et al. Debugging in the (very) large: ten years of implementation and experience. *ACM Communications*. New York City, NY, USA, 2011. № 7, vol. 54, pp. 111–116.
4. Iftekhhar A., Nitin M., Carlos J. The Impact of Automatic Crash Reports on Bug Triaging and Development in Mozilla. *The 14th International Symposium on Open Collaboration*. Berlin, 2014.
5. *Carnegie Mellon University Software Engineering Institute. Software Product Lines*. Available at: <https://www.sei.cmu.edu/productlines> (accessed 11.05.2018).
6. Asmaa A., Ounsa R., Nissrine S., Camille S. Selecting SPL Modeling Languages: a Practical Guide. *The Third World Conference on Complex Systems (WCCS), 2016*. Marrakech, Morocco, November 2015.
7. Tejinder D., Foutse K., Ying Z. Classifying Field Crash Reports for Fixing Bugs: A Case Study of Mozilla Firefox. *The 27th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM)*. Williamsburg, VA, USA, September 2011.
8. *Graylog*. Available at: <https://www.graylog.org/overview> (accessed 11.05.2018).
9. *Aggregates Plugin for Graylog*. Available at: <https://marketplace.graylog.org/addons/0d01a899-138a-4f77-a9e7-04be4cc5e190> (accessed 11.05.2018).
10. *Sentry*. Available at: <https://sentry.io/for/javascript> (accessed 11.05.2018).
11. *Google Play Console*. Available at: <https://play.google.com/apps/publish/> (accessed 11.05.2018).
12. *Firestore crash reporting*. Available at: <https://firebase.google.com/docs/crash/> (accessed 11.05.2018).
13. *Xcode*. Available at: <https://developer.apple.com/xcode/> (accessed 11.05.2018).
14. *Firestore Crashlytics*. Available at: <https://firebase.google.com/docs/crashlytics/> (accessed 11.05.2018).
15. *Crashlytics reports*. Available at: <http://try.crashlytics.com/reports/> (accessed 11.05.2018).
16. Wang S., Khomh F., Zou Y. Improving bug localization using correlations in crash reports. *The 10th IEEE Working Conference on Mining Software Repositories*. San Francisco, CA, USA, May 2013, pp. 247–256.
17. Tkachuk M.V., Abbasov T.F. An operating model for dynamic requirements management in agile software development. *The XXV International Scientific and Practical Conference on Information Technologies MicroCAD-2018*. Kharkiv, May 2018, p.12.

Received 19.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Зінковський Олексій Ілліч (Зинковский Алексей Ильич, Zinkovskiy Oleksii Illich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6234-8817>; e-mail: [aleksey.zinkovskiy95@gmail.com](mailto:aleksey.zinkovskiy95@gmail.com)

**Гамзаєв Рустам Олександрович (Гамзаев Рустам Александрович, Gamzayev Rustam Olexandrovich)** – 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/0000-0002-2713-5664>; e-mail: [rustam.gamzaev@gmail.com](mailto:rustam.gamzaev@gmail.com)

**Андреас Боллін (Андреас Боллин, Andreas Bollin)** – доктор технічних наук, професор, Альпен-Адрія університет, керівник Інституту дидактики інформатики (Alpen-Adria University, Head of Department of Informatics Didactics); м. Клагенфурт, Австрія (Klagenfurt, Austria); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4031-5982>; e-mail: [andreas.bollin@aau.at](mailto:andreas.bollin@aau.at)

**Ткачук Микола Вячеславович (Ткачук Николай Вячеславович, Tkachuk Mykola Vyacheslavovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри моделювання систем і технологій, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: [tka.mobile@gmail.com](mailto:tka.mobile@gmail.com)

**С. Ф. ЧАЛИЙ, Є. О. БОГАТОВ, І. Б. ПРИБИЛЬНОВА**

### **МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ УПОРЯДКОВАНИХ ПО ПРОЦЕСАМ ТРАС ЖУРНАЛУ ПОДІЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ**

Досліджено проблему формування вхідних даних для побудови моделей бізнес-процесів методами інтелектуального аналізу процесів. Показано, що журнали подій реальних інформаційних систем не завжди відповідають вимогам щодо впорядкованості вхідних даних по процесам, тобто журнал може мати одну трасу із подіями з різних бізнес-процесів. Вирішено задачі аналізу особливостей трас в журналі подій бізнес-процесу і розробки методів формування упорядкованих по процесам трас журналу подій інформаційної системи процесного управління на основі виявлення кінцевої події бізнес-процесу. Другий метод формує траси логів бізнес-процесів. Перший метод формує траси журналу бізнес-процесу на основі попарного порівняння атрибутів подій за критерієм максимізації кількості спільних значень атрибутів для цієї пари. Метод послідовно вибирає події із спільної траси для декількох бізнес-процесів та після попарного порівняння атрибутів із подіями трас конкретних бізнес-процесів визначає належність наступної події до траси відповідного процесу. При порівнянні виконується також виявлення кінцевої події бізнес-процесу. Другий метод формує траси логів на основі порівняння інваріанту атрибутів подій та події, що аналізується, за критерієм максимізації ваги значень спільних атрибутів. На відміну від першого методу, при виборі нового бізнес-процесу формується інваріант у вигляді суми ваг значень атрибутів логів бізнес-процесу. Ваги значень атрибутів відображають кількість появ цих значень при виконанні бізнес-процесу. Це дає можливість врахувати історію виконання бізнес-процесу при реалізації методу. У практичному плані обидва запропоновані методи дозволяють сформувати множини журналів подій бізнес-процесів, що виконуються паралельно, у форматі, придатному для використання методів та технологій інтелектуального аналізу процесів. Перший метод має більш низьку точність. Проте його перевагою є можливість застосування лише при наявності спільної траси декількох бізнес-процесів, без попередньо відомих упорядкованих трас логів кожного бізнес-процесу. Другий метод дозволяє підвищити точність виділення траси подій для кожного бізнес-процесу. Недолік даного методу полягає в тому, що він потребує апріорного формування інваріанту атрибутів подій бізнес-процесу.

**Ключові слова:** бізнес-процеси, інтелектуальний аналіз процесів, процесне управління, траса, журнал подій, атрибути подій, ресурси бізнес-процесу, темпоральні характеристики подій.

**С. Ф. ЧАЛИЙ, Е. О. БОГАТОВ, И. Б. ПРИБИЛЬНОВА**

### **МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ УПОРЯДОЧЕННЫХ ПО ПРОЦЕССАМ ТРАСС ЖУРНАЛА СОБЫТИЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЦЕССНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Исследована проблема формирования входных данных для построения моделей бизнес-процессов методами интеллектуального анализа процессов. Показано, что журналы событий реальных информационных систем не всегда соответствуют требованиям упорядоченности входных данных по процессам, то есть журнал может иметь одну трассу с событиями из различных бизнес-процессов. Решены задачи анализа особенностей трасс в журнале событий бизнес-процесса и разработки методов формирования упорядоченных по процессам трасс журнала событий информационной системы процессного управления на основе сравнения атрибутов событий и на основе сравнения с инвариантами атрибутов событий логов бизнес-процессов. Первый метод формирует трассы журнала бизнес-процесса на основе попарного сравнения атрибутов событий по критерию максимизации количества совместных значений атрибутов для этой пары. Метод последовательно выбирает события из общей трассы для нескольких бизнес-процессов и после парного сравнения атрибутов с событиями трасс конкретных бизнес-процессов определяет принадлежность следующего события к трассе соответствующего процесса. При сравнении выполняется также выявление конечного события бизнес-процесса. Второй метод формирует трассы лог на основе сравнения инварианта атрибутов событий и события, которое анализируется, по критерию максимизации веса значений общих атрибутов. В отличие от первого метода, при выборе нового бизнес-процесса формируется инвариант в виде суммы весов значений атрибутов лог бизнес-процесса. Весы значений атрибутов отражают количество появлений этих значений при выполнении бизнес-процесса. Это дает возможность учесть историю выполнения бизнес-процесса при реализации метода. В практическом плане оба предложенных метода позволяют сформировать набор журналов событий бизнес-процессов, выполняемых параллельно, в формате, пригодном для использования методов и технологий интеллектуального анализа процессов. Первый метод имеет более низкую точность. Однако его преимуществом является возможность применения при наличии только совместной трассы нескольких бизнес-процессов, без предварительно известных упорядоченных трасс лог каждого бизнес-процесса. Второй метод позволяет повысить точность выделения трассы событий для каждого бизнес-процесса. Недостаток данного метода заключается в том, что он требует априорного формирования инварианта атрибутов событий бизнес-процесса.

**Ключевые слова:** бизнес-процессы, интеллектуальный анализ процессов, процессное управление, трасса, журнал событий, атрибуты событий, ресурсы бизнес-процесса, темпоральные характеристики событий.

**S. F. CHALYI, E. O. BOGATOV, I. B. PRIBYLNVA**

### **TECHNIQUES OF REORDERING TRACES IN THE EVENT LOGS IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT TASKS**

The problem of formation of input data for construction of models of business processes by methods of the intellectual analysis of processes is studied. It is shown that event logs of real information systems do not always meet the requirements of the ordering of input data on processes, that is, a log can have one track with events from different business processes. The tasks of analysis of trace characteristics in the business process event log and the development of methods for forming process events information order tracks organized on the basis of the comparison of event attributes and on the basis of comparison with the invariants of the event attributes of the business process logs are organized in the processes of the log of events events of the process management information system. The first method generates business process log lines based on pairwise comparison of event attributes based on the criterion for maximizing the number of shared attribute values for this pair. The method sequentially selects events from the common path for several business processes, and after pairwise comparison of the attributes with the events of the traces of specific business processes, determines the belonging of the next event to the path of the corresponding process. When comparing, the end event of the business process is also detected. The second method generates log lines based on the comparison of the invariant of the event attributes and the event, which is analyzed by the criterion of maximizing the weight of the values of the common attributes. Unlike the first method, when choosing a new business process, an invariant is created in the form of a sum of weights of the values of the attributes of the log of the business process. The scales of attribute values reflect the number of occurrences of these values in the execution of the business process. This allows you to take into account the history of the implementation of the business process in implementing the method. In practical terms, both proposed methods allow the formation of a set of business process event logs that are executed in parallel in a format suitable for use of methods and technologies of the intellectual analysis of processes. The first method has a

lower accuracy. However, its advantage is the ability to use in the presence of only a joint path of several business processes, without the previously known orderly traces log of each business process. The second method allows you to increase the accuracy of the highlighting of the event path for each business process. The disadvantage of this method is that it requires a priori formation of the invariant of the attributes of the business process events.

**Keywords:** business process, process mining, process management, trace, event log, event attributes, business process resources, event time stamp.

**Вступ.** В останні десятиліття відбулася еволюція підходів до управління підприємством, від орієнтації на вирішення конкретних функціональних завдань підприємства до супроводу, моніторингу та аналізу процесів, які пронизують підприємство [1, 2].

Бізнес-процесом (БП) є послідовність робіт, пов'язаних причинно-наслідковими зв'язками, які виконуються для досягнення конкретної мети організації, пов'язаної з виробництвом продукції чи послуг. Управління бізнес-процесами передбачає вирішення задач побудови процесних моделей та подальше управління за відхиленням згідно параметрів цих моделей [3, 4].

При побудові моделі БП спочатку формується поточна модель процесу «як є», яка потім трансформується до моделі бажаного виду «як повинно бути». Побудова моделі «як є» виконується в результаті аналізу зібраних на попередньому етапі даних. У процесі такого аналізу здійснюється виявлення структурних елементів та знань про БП підприємства [5, 6].

З метою скорочення витрат часу на побудову моделі «як є» використовуються методи інтелектуального аналізу бізнес-процесів – process mining [7].

Побудова моделей БП в рамках даної технології здійснюється шляхом аналітичної обробки журналів (логів) подій інформаційної системи. Кожен журнал подій складається з трас. Траса містить упорядковану в часі послідовність подій. Кожна подія відповідає дії бізнес-процесу або зміні стану цієї дії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методи інтелектуального аналізу процесів [7–12] орієнтовані на використання журналів подій з такими характеристиками: наявність великих обсягів даних про конкретний бізнес-процес, що накопичені в результаті багаторазового виконання процесу [7, 10]; наявність певної структури в логах, яка відображає зв'язки між діями процесу, виконавцями, ресурсами, тощо [7, 11].

На практиці на підприємстві паралельно виконується множина бізнес-процесів, як формалізованих і представлених в системі управління, так і латентних, що відповідають корпоративній культурі [6]. В результаті лог може містити у собі події різних процесів у вигляді однієї траси. Так траса складається з упорядкованої в часі об'єднаної послідовності подій всіх паралельних бізнес-процесів. Послідовний перехід між подіями для такої траси може вести від одного процесу до іншого.

Зазначена особливість об'єднаного логу не дозволяє використовувати традиційні методи інтелектуального аналізу процесів для побудови моделей БП «як є», що потребує розробки методів формування упорядкованих по процесам журналів

подій із такого об'єднаного логу та свідчить про актуальність теми даної статті.

**Метою даної статті** є розробка методів передньої обробки журналу подій з тим, щоб розділити об'єднану трасу з подій різних бізнес-процесів на окремі траси для кожного БП, що дає можливість формувати моделі бізнес-процесів «як є» традиційними методами інтелектуального аналізу процесів.

Для досягнення мети вирішуються задачі:

– аналіз особливостей трас в журналі подій бізнес-процесу;

– розробка методу формування упорядкованих по процесам трас журналу подій інформаційної системи процесного управління на основі порівняння атрибутів подій;

– розробка методу формування упорядкованих по процесам трас журналу подій інформаційної системи процесного управління на основі порівняння з інваріантами атрибутів подій логів бізнес-процесів.

**Структуризація журналу подій.** Журнал подій відображає послідовність виконання одного або підмножини процесів підприємства. Фаза виконання є однією з фаз життєвого циклу бізнес-процесу, що відображають послідовність реалізації задач процесного управління. Задачі управління такими бізнес-процесами виконуються у такій послідовності:

– побудова «з чистого листа» або удосконалення моделі бізнес-процесу;

– впровадження (конфігурування) моделі бізнес-процесу в системі процесного управління;

– виконання та моніторинг дій бізнес-процесу;

– аналіз результатів виконання.

У результаті виконання першої задачі формується модель процесу у вигляді можливих його станів та послідовностей дій, що призводять до переходів між станами. При побудові бізнес-процесу можуть бути використані журнали подій (логи). В такому випадку використовуються методи інтелектуального аналізу процесів.

При виконанні другої задачі виконується доповнення моделі можливостями програмної платформи, наприклад можливостям автоматичного виконання робіт з використанням програмних засобів цієї платформи.

При виконанні третьої задачі послідовність виконання кожного бізнес-процесу фіксується в лозі (log) системи процесного управління.

При виконанні четвертої задачі проводиться перевірка властивостей виконаного процесу, а також його відповідності моделі. Для цього виконується аналіз логу процесу методами process mining [12]. За результатами аналізу виконується коригування моделі бізнес-процесу.

Послідовність подій траси відображає виконання одного екземпляру бізнес-процесу, або сукупності

процесів, що виконуються паралельно. Кожна подія траси описує стан бізнес-процесу після завершення чергової дії. Подія характеризується часом її виникнення, а також множиною значень атрибутів, що відображають стан дії та ресурсів бізнес-процесу, наприклад: найменування дії; роль та ім'я виконавця; назва об'єкту управління; тощо. Траса  $\pi_i$  є направленим ациклічним графом та містить у собі кінцеву упорядковану в часі послідовність подій:

$$\pi_i = \langle e_{i1}, \dots, e_{ij}, \dots \rangle, \{ \succ \}, \quad (1)$$

де  $e_{ij}$  – подія траси;

$\succ$  – відношення переходу між подіями траси

Кожна подія складається із множини міток часу та атрибутів, що відображають використані ресурси:

$$e_{ij} = \{t_{ij}, A_{ij}\}, \quad (2)$$

де  $t_{ij}$  – час виникнення події;

$A_{ij} = \{a_{ij}^k\}$  – події.

У виразі (2) для спрощення подальшого опису критеріїв в якості елементів множини атрибутів ми розглядаємо пари (назва атрибуту, значення атрибуту). Тобто при співпаданні атрибутів повинні співпадати як його назва, так і його значення. Таке спрощення ґрунтується на описі атрибутів у стандартному журналі подій у вигляді текстової строки з двох вказаних елементів.

На основі проведеної структуризації журналу подій можемо зробити такі висновки.

В якості вхідних даних при побудові моделей процесів методами process mining виступають логи інформаційних систем, які мають спеціальну структуру [13].

Ключова особливість структури таких журналів полягає в тому, що події в них повинні бути зафіксовані по процесам. Іншими словами, кожна реалізація процесу повинна бути відображена окремим записом у вигляді трас процесу: послідовності подій з часовими мітками. Кожна подія траси логу фіксує виконання відповідної дії процесу.

У той же час логи реальних інформаційних систем не завжди відповідають зазначеним вимогам. З одного боку, традиційні системи колективної роботи не фіксують виконання процесів. Тому їх логи містять послідовності подій, що відносяться до різних процесів. Також логи процесно-орієнтованих систем часто містять неповну інформацію для побудови процесної моделі.

**Метод формування упорядкованих по процесам трас журналу подій на основі порівняння атрибутів подій.** При нормальному виконанні бізнес-процесу кожна траса має початкову та фінальні події. Кінцева подія відображає успішне завершення бізнес-процесу.

У випадку єдиної траси для множини паралельних процесів не виділяються початкові та кінцеві події для кожного бізнес-процесу, що не дозволяє відрізнити окремі БП.

Для вирішення цієї проблеми пропонується виділити траси паралельних процесів з єдиної траси

журналу подій. При виділенні трас перевіряється порядок подій у часі та використання ресурсів бізнес-процесу. Порядок подій визначається мітками часу, а використання ресурсів – значеннями атрибутів бізнес-процесу.

Ідея запропонованого методу полягає в тому, що відмінності у використанні ресурсів між двома послідовними подіями з одного процесу будуть менше ніж відмінності між атрибутами подій з різних бізнес-процесів.

Наприклад, для пари послідовних подій процесу обробки договорів між підприємствами буде вказана назва одного й того ж договору, однакові реквізити підприємств але, можливо, зміниться виконавець роботи.

В різних процесах значення атрибутів, як правило, будуть відрізнятися. Тому критерій для включення події  $e_{ij}$  до траси  $\pi_i$  бізнес-процесу полягає в знаходженні максимальної кількості спільних значень атрибутів  $a_k$ :

$$K_1 = \max_i (|a_{ij}^k \cap a_{ij+1}^k|), \quad (3)$$

Ознакою кінцевої події для бізнес-процесу є мінімальне, нижче порогового, значення кількості спільних значень атрибутів для двох послідовних подій логу сукупності паралельних бізнес-процесів:

$$\max_i (|a_{ij}^k \cap a_{ij+1}^k|) < \varepsilon, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – порогове значення кількості спільних атрибутів між двома послідовними подіями логу.

В такому випадку критерієм  $K_{1f}$  переходу до кінцевої події бізнес-процесу  $e_{ij+1}$  буде:

$$K_{1f} = \max_i (|a_{ij}^k \cap a_{ij+1}^k| \mid \text{iff} |a_{ij}^k \cap a_{ij+1}^k| < \varepsilon). \quad (5)$$

Запропонований метод формування упорядкованих по процесам трас журналу подій на основі порівняння атрибутів використовує наведені критерії, та характеризується такими особливостями.

Вхідними даними методу є послідовність подій у вигляді траси, що містить сукупність подій з декількох паралельних бізнес-процесів, або ж траса логу традиційної, функціонально-орієнтованої системи управління. Послідовність подій та характеристики цих подій представлені у вигляді (1) та (2).

Вихідними даними методу є журнал у вигляді множини трас, причому кожна траса відповідає окремому бізнес-процесу:

$$P^* = \{\pi_i^* \mid \forall l \text{ } \exists \pi_l \rightarrow \pi_i^*\}, \quad (6)$$

де  $\pi_l$  – бізнес-процес, якому відповідає траса  $\pi_i^*$ ;

$P$  – лог з трасами декількох бізнес-процесів.

Метод містить у собі такі етапи.

Етап 1. Вибір бізнес-процесу  $\pi_l$ .

Етап 2. Вибір першої події  $e_{i1}$  з мінімальним значенням параметру часу  $t_{i1}$ .

Етап 3. Перевірка критерію (4) для поточної події  $e_{ij}$  траси  $\pi_i$ . У випадку, якщо критерій (4) задовольняється то перехід до етапу 7, інакше – етапу 4.

Етап 4. Вибір наступної події  $e_{ij+1}$  бізнес-процесу  $Vp_i$  за критерієм (3).

Етап 5. Доповнення траси  $\pi_i^*$  подією  $e_{ij+1}$ .

Етап 6. Вибір події  $e_{ij+1}$  в якості поточної та перехід до етапу 3.

Етап 7. Виявлення кінцевої події у відповідності до критерію (5).

Етап 8. Доповнення траси  $\pi_i^*$  кінцевою подією.

Етап 9. Перевірка: якщо розглянуто всі бізнес-процеси, то завершення роботи, в іншому випадку – перехід до етапу 1.

**Метод формування упорядкованих по процесам трас журналу подій на основі на основі порівняння з інваріантом атрибутів.** Даний метод, на відміну від попереднього, передбачає формування інваріанту множини атрибутів логу бізнес-процесу при розгляді нового БП.

Інваріант множини атрибутів подій логу бізнес-процесу для задачі формування трас містить у собі суму ваг значень атрибутів подій, причому кожна вага атрибуту відповідає кількості повторень цього значення в атрибутах подій бізнес-процесу.

Критерій для включення події  $e_{ij}$  до траси  $\pi_i$  бізнес-процесу полягає в знаходженні максимальної кількості спільних значень атрибутів  $a_k$  з урахуванням їх ваги:

$$K_2 = \max_i \sum_{k=1}^K (w^k (a_{ij+1}^k)), \quad (7)$$

де  $w^k$  – кількість повторень значення  $k$ - атрибуту в ході виконання бізнес-процесу на всіх можливих трасах;

Вага атрибуту з відповідним значення обраховується наступним чином:

$$w^k = |\{a_{ij}^k\}| |Vp_i \rightarrow \pi_i^*. \quad (8)$$

Нормування ваги в даному випадку не проводиться, оскільки виконується обробка траси з різних бізнес-процесів. За один і той же проміжок часу різні процеси можуть продукувати різну кількість подій.

Ознакою кінцевої події для бізнес-процесу даному випадку є мінімальна, нижче порогу, сума ваг атрибутів подій бізнес-процесів:

$$\max_i \sum_{k=1}^K (w^k (a_{ij+1}^k)) < \varepsilon. \quad (9)$$

В такому випадку критерієм  $K_{2f}$  переходу до кінцевої події бізнес-процесу  $e_{ij+1}$  буде:

$$K_{2f} = \max_i \sum_{k=1}^K (w^k (a_{ij+1}^k)) \text{ if } w^k (a_{ij+1}^k) < \varepsilon. \quad (10)$$

Метод містить у собі такі етапи.

Етап 1. Вибір бізнес-процесу  $Vp_i$ .

Етап 2. Формування інваріанту бізнес-процесу шляхом визначення ваг атрибутів  $w^k$ .

Етап 3. Вибір першої події  $e_{i1}$  з мінімальним значенням параметру часу  $t_{i1}$ .

Етап 4. Перевірка критерію (8) щодо закінчення бізнес-процесу для поточної події  $e_{ij}$  траси  $\pi_i$ . У

випадку, якщо критерій (8) задовольняється, то перейти до етапу 8, інакше – етапу 5.

Етап 5. Вибір наступної події  $e_{ij+1}$  бізнес-процесу  $Vp_i$  за критерієм (7).

Етап 6. Доповнення траси  $\pi_i^*$  подією  $e_{ij+1}$ .

Етап 7. Вибір події  $e_{ij+1}$  в якості поточної та перехід до етапу 3.

Етап 8. Виявлення кінцевої події у відповідності до критерію (10).

Етап 9. Доповнення траси  $\pi_i^*$  кінцевою подією.

Етап 10. Перевірка: якщо розглянуто всі бізнес-процеси, то завершення роботи, в іншому випадку – перехід до етапу 1.

Для експериментальної перевірки методів формування упорядкованих по процесам трас журналу подій ми використали лог, що відображає сукупність процесів розробки програмного забезпечення за гнучкою методологією. Лог містить одну неупорядковану по процесам трасу. Вхідні дані мають «csv» – формат. Результуючі дані сформовані в стандарті «xes». В результуючих даних відокремлені процеси тестування та планування й контролю ходу виконання спринта.

Також було проведено експерименти з об'єднанням трас із декількох процесів у одну трасу. Ми об'єднували події з трас із різних бізнес-процесів (від 20 до 150) та упорядкували їх за мітками часу.

Результати експерименту показали, що перший метод дозволяє ідентифікувати від 91 до 95 відсотків трас, а других – від до 93 до 97 відсотків.

**Висновки.** Розглянуто проблему побудови вхідних даних для побудови моделей бізнес-процесів методами інтелектуального аналізу процесів. Показано, що існуючі методи орієнтовані в першу чергу на використання упорядкованих по процесам даних. Такі дані у вигляді журналів подій формуються інформаційною системою процесного управління. Журнали подій повинні містити сукупність трас, кожна з яких показує послідовність виконання одного екземпляру бізнес-процесу.

Однак журнали подій реальних інформаційних систем не завжди відповідають зазначеним вимогам. По-перше, традиційні системи колективної роботи не фіксують виконання процесів. Тому їх логи містять послідовності подій, що відносяться до різних процесів. По-друге, логи процесно-орієнтованих систем часто містять неповну або недостатньо структуровану інформацію для побудови процесної моделі.

У рамках вирішення визначеної проблеми запропоновані методи формування упорядкованих по процесам трас журналу подій інформаційної системи процесного управління.

Перший метод формує траси логу на основі попарного порівняння атрибутів подій за критерієм максимізації кількості значень спільних атрибутів для пари подій. Метод послідовно вибирає події із спільної траси для декількох бізнес-процесів та після попарного порівняння з атрибутами подій траси конкретного бізнес-процесу визначає належність наступної події до останньої траси. При попарному

порівняння виконується також виявлення кінцевої події бізнес-процесу.

Другий метод формує траси логів на основі порівняння атрибутів подій інваріанту атрибутів журналу подій конкретного бізнес-процесу та події, що аналізується, за критерієм максимізації сумарної ваги спільних атрибутів. Це дає можливість врахувати історію виконання БП при порівнянні атрибутів подій логів.

В практичному плані обидва запропоновані методи дозволяють сформувати журнали подій у форматі, придатному для використання методів та технологій інтелектуального аналізу процесів.

#### Список літератури

1. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 403 p.
2. Vom Brocke J., Rosemann M. *Handbook on Business Process Management I. Introduction, Methods, and Information Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2015. 709 p.
3. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2013. 391 p.
4. Kumar A., Van Der Aalst W. M. P., Verbeek E. M. W. Dynamic Work Distribution in Workflow Management Systems: How to Balance Quality and Performance? *Journal of Management Information Systems*. NY, USA, 2002, vol. 18(3). P. 157–193.
5. Vanderfeesten I., Reijers H. A., Van Der Aalst W. M. P. Product-Based Workflow Support. *Information Systems*. 2011, vol. 36(2). P. 517–535.
6. Van Der Aalst W. M. P. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. P. 1–37.
7. Van Der Aalst W. M. P. *Process Mining: Data Science in Action*. Springer-Verlag, Berlin, 2016. 467 p.
8. Tax N., Sidorova N., Haakma R., Van Der Aalst W. M. P. Mining Process Model Descriptions of Daily Life through Event Abstraction. *Studies in Computational Intelligence*. 2017. P. 83–104.
9. Tax N., Sidorova N., Haakma R., Van Der Aalst W. M. P. Mining local process models. *Journal of Innovation in Digital Ecosystems*. 2016. vol. 3(2). P.183–196.
10. Bolt A., De Leoni M, Van der Aalst W.M.P. Scientific Workflows for Process Mining: Building Blocks, Scenarios, and Implementation. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2016. vol. 18(6). P.607–628.
11. Mannhardt F., Leoni de M., Reijers H.A., Van der Aalst W.M.P., Toussain P.J., From Low-Level Events to Activities - A Pattern-Based Approach. *International Conference on Business Process Management (BPM 2016)*. Berlin, Springer-Verlag, 2016. vol. 9850. P. 125–141.
12. Левикин В. М., Чалая О.В. Модель жизненного цикла знания-емкого бизнес-процесса. *Управляющие системы и машины*. Киев, УСМ, 2017. № 1. С. 68–76.
13. Kalenkova A. A., Van Der Aalst W. M. P., Lomazova I. A., Rubin V. A. Process mining using BPMN: relating event logs and process models. *Software & Systems Modeling*. 2017, vol. 16. P. 1019–1048.
14. Чалый С.Ф., Левикин И.В. Метод построения интервальной модели процесса решения задачи в составе прецедента на основе анализа журнала событий. *Научные работы ВНТУ*. Винница, ВНТУ, 2016, № 4. С. 1-8.

#### References (transliterated)

1. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 403 p.
2. Vom Brocke J., Rosemann M. *Handbook on Business Process Management I. Introduction, Methods, and Information Systems*. Berlin, Springer-Verlag, 2015. 709 p.
3. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2013. 391 p.
4. Kumar A., Van Der Aalst W. M. P., Verbeek E. M. W. Dynamic Work Distribution in Workflow Management Systems: How to Balance Quality and Performance? *Journal of Management Information Systems*. Dynamic Work Distribution in Workflow Management Systems: How to Balance Quality and Performance? NY, USA, 2002, vol. 18(3), pp. 157–193.
5. Vanderfeesten I., Reijers H. A., Van Der Aalst W. M. P. Product-Based Workflow Support. *Information Systems*. 2011, vol. 36(2), pp. 517–535.
6. Van Der Aalst W. M. P. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. pp. 1–37.
7. Van Der Aalst W. M. P. *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin, Springer-Verlag, 2016. 467 p.
8. Tax N., Sidorova N., Haakma R., Van Der Aalst W. M. P. Mining Process Model Descriptions of Daily Life through Event Abstraction. *Studies in Computational Intelligence*. 2017, pp. 83–104.
9. Tax N., Sidorova N., Haakma R., Van Der Aalst W. M. P. Mining local process models. *Journal of Innovation in Digital Ecosystems*. 2016, vol.3(2), pp.183–196.
10. Bolt A., De Leoni M, Van der Aalst W.M.P. Scientific Workflows for Process Mining: Building Blocks, Scenarios, and Implementation. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2016, vol. 18(6), pp.607–628.
11. Mannhardt F., Leoni de M., Reijers H.A., Van der Aalst W.M.P., Toussain P.J., From Low-Level Events to Activities - A Pattern-Based Approach. *International Conference on Business Process Management (BPM 2016)*. Berlin, Springer-Verlag, 2016, vol. 9850. pp. 125–141.
12. Levykin V.M., Chalaya O.V. Model' zhyznennogo tsykla znanye-emkogo biznes-protessa [Model of lifecycle of knowledge-intensive business process]. *Upravliaushie systemy i mashyny* [Control systems and machines]. Kiev, «CSC», 2017, no. 1, pp. 68–76
13. Kalenkova A. A., Van Der Aalst W. M. P., Lomazova I. A., Rubin V. A. Process mining using BPMN: relating event logs and process models. *Software & Systems Modeling*. 2017, vol. 16. pp. 1019–1048.
14. Chalyi S. F., Levykin I.V. Method postroeniya interval'noy modeli protessa resheniya zadachi v sostave pretsedenta na osnove analiza zurnala sobytiy [Development of method forming process model solution tasks of a part case-based reasoning]. *Naukovi pratsi VNTU* [Scientific works of VNTU]. Vinnitsa, VNTU, 2016, no. 4, pp. 1-8.

Надійшла (received) 05.02.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Чалый Сергій Федорович (Чалый Сергей Федорович, Chalyi Serhii Fedorovich)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Богатов Євген Олегович (Богатов Евгений Олегович, Bogatov, Evgen Olegovich)** – асистент кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-7222>; e-mail: [bogatovevgeniy@gmail.com](mailto:bogatovevgeniy@gmail.com)

**Прибільнова Інна Борисівна (Прибыльнова Инна Борисовна, Pribylnova Inna Borisovna)** – доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6851-5340>; e-mail: [inna.butukina@nure.ua](mailto:inna.butukina@nure.ua)

***В. М. ЛЕВИКІН, О. В. ЧАЛА***

### **РОЗРОБКА ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ БАЗИ ЗНАТЬ СИСТЕМИ ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ**

Досліджено проблему побудови представлення знань в системі процесного управління для знання-ємних бізнес-процесів в аспекті відображення причинно-наслідкових зв'язків між контекстом виконання дій та діями бізнес-процесу. Показано, що загальний підхід до вирішення цієї проблеми пов'язаний із виділенням каузальних залежностей на основі аналізу логу подій, що містить записи про поведінку бізнес-процесу. При вирішенні проблеми сформульовано задачі уточнення структури представлення причинно-наслідкового аспекту знань у відповідності до особливостей логу; побудови логічних фактів і правил у відповідності до структури подій логу; формалізації представлення знань з урахуванням фактів, правил та апіорних обмежень. Встановлено, що зв'язок між артефактами контексту та подіями логу бізнес-процесу здійснюється через спільні атрибути. Між артефактами й атрибутами та між подіями й атрибутами існує відношення один до багатьох. Структурована логічна складова бази знань у вигляді логічних фактів та правил. Логічні факти визначають стан бізнес-процесу у дискретні моменти часу на основі значень властивостей артефактів. Правила виводу визначають зміну стану бізнес-процесу. Запропоновано представлення знань, що враховує стан контексту виконання дій бізнес-процесу у вигляді зважених логічних фактів, а також правил виводу, які забезпечують підтримку вибору дій з урахуванням поточного стану контексту. Відмінність запропонованого представлення полягає в тому, що при визначенні фактів враховуються атрибути подій, а правил – структура та послідовність подій логу бізнес-процесу. Також враховуються апіорні знання про предметну область у вигляді обмежень. Практичне значення представлення знань полягає у можливості автоматизованого виявлення причинно-наслідкових залежностей між діями бізнес-процесу у відповідності до інформації, що входить до складу його логу.

**Ключові слова:** знання-ємні бізнес-процеси, база знань, системи процесного управління, контекст, артефакт, подія, атрибут, причинно-наслідкові зв'язки.

***В. М. ЛЕВЫКИН, О. В. ЧАЛАЯ***

### **РАЗРАБОТКА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Исследована проблема построения представления знаний в системе процессного управления для знания-емких бизнес-процессов в аспекте отражения причинно-следственных связей между контекстом выполнения действий и действиями бизнес-процесса. Показано, что общий подход к решению этой проблемы связан с выделением каузальных зависимостей на основе анализа лога событий, содержащего записи о поведении бизнес-процесса. При решении проблемы сформулированы задачи уточнения структуры представления причинно-следственного аспекта знаний в соответствии с особенностями лога; построения логических фактов и правил в соответствии со структурой событий лога; формализации представления знаний с учетом фактов, правил и априорных ограничений. Установлено, что связь между артефактами контекста и событиями лога бизнес-процесса осуществляется через общие атрибуты. Между артефактами и атрибутами и между событиями и атрибутами существует отношение один ко многим. Структурирована логическая составляющая базы знаний в виде логических фактов и правил. Логические факты определяют состояние бизнес-процесса в дискретные моменты времени на основе значений свойств артефактов. Правила вывода определяют изменение состояния бизнес-процесса. Предложено представление знаний, учитывающее состояние контекста выполнения действий бизнес-процесса в виде взвешенных логических фактов, а также правил вывода, которые обеспечивают поддержку выбора действий с учетом текущего состояния контекста. Отличие предложенного представления заключается в том, что при определении фактов учитываются атрибуты событий, а правил - структура и последовательность событий лога бизнес-процесса. Также учитываются априорные знания о предметной области в виде ограничений. Практическое значение представления знаний состоит в возможности автоматизированного выявления причинно-следственных зависимостей между действиями бизнес-процесса в соответствии информацией в его логе.

**Ключевые слова:** знание-емкие бизнес-процессы, база знаний, системы процессного управления, контекст, артефакт, событие, атрибут, причинно-следственные связи

***V. M. LEVYKIN, O. V. CHALA***

### **DEVELOPMENT OF THE REPRESENTATION OF CAUSE-EFFECT DEPENDENCIES FOR THE KNOWLEDGE BASE OF THE BUSINESS PROCESS MANAGEMENT SYSTEM**

The problem of constructing knowledge representation in the process control system for knowledge-capacious business processes in the aspect of reflecting the cause-effect relationships between the context of performance of actions and the actions of the business process is studied. It is shown that the general approach to solving this problem is related to the isolation of causal dependencies on the basis of an analysis of the event log containing records of the behavior of the business process. When solving the problem, problems of clarifying the structure of the representation of the cause-effect aspect of knowledge are formulated in accordance with the features of the log of the information system of process control; the construction of logical facts and rules in accordance with the structure of log events; formalization of knowledge representation taking into account facts, rules and a priori restrictions. It is established that the connection between the artifacts of the context and the events of the business process log is carried out through common attributes. Between artifacts and attributes and between events and attributes, there is one-to-many relationship. The logical component of the knowledge base is structured in the form of logical facts and rules. Logical facts determine the state of the business process at discrete points in time based on the values of the properties of artifacts. The output rules determine the change in the state of the business process. A knowledge representation is proposed that takes into account the state of the context for the execution of business process actions in the form of weighted logical facts, as well as output rules that support the selection of actions taking into account the current state of the context. The difference between the proposed representation is that when defining facts, the attributes of events are taken into account, and the rules are the structure and sequence of events of the business process log. A priori knowledge of the subject area in the form of constraints is also taken into account. The practical importance of the knowledge representation is the ability to automatically identify the cause-effect relationships between the actions of the business process in accordance with the information in its log.

**Keywords:** knowledge-intensive business processes, knowledge base, process management systems, context, artifact, event, attribute, cause-effect relationships



**Вступ.** Системи процесного управління реалізують управління множиною бізнес-процесів (БП) підприємства. Бізнес-процес описує схему дій щодо вирішення відповідної функціональної задачі. На відміну від функціонального підходу до управління, при процесному управлінні організаційна структура підприємства враховується лише частково, процеси об'єднують виконавців із різних підрозділів [1]. Процесне управління підприємством базується на використанні моделей бізнес-процесів [2]. Традиційно при процесному управлінні реалізується цикл побудови моделей, їх впровадження, управління за допомогою моделей, аналізу, а також коригування моделей після завершення виконання бізнес-процесу.

Однак в умовах постійних змін вимог ринку, складу виконавців, заміни ресурсів процесу виникає практична потреба в уточненні дій безпосередньо при виконанні БП, що в результаті призводить до виникнення невідповідності між знання-ємним бізнес-процесом та його моделлю. Дана проблема є особливо актуальною для класу знання-ємних бізнес-процесів, тому що такі процеси є багатоваріантними та можуть змінювати поточну послідовність дій за результатами рішень виконавців з урахуванням поточних зовнішніх впливів [3]. Рішення виконавців базуються не лише на загальновідомих знаннях про бізнес-процесі, але й на отриманому під час виконання БП специфічному для конкретного процесу та стану предметної області персональному досвіді [4], який не відображено у процесній моделі.

В результаті виникає актуальна проблема побудови представлення знань в системі процесного управління, яке забезпечувало б можливість автоматизованого їх виявлення. Потреба у автоматизованій побудові знань є наслідком неефективності традиційних методів інженерії знань щодо виявлення неявних знань виконавців, оскільки останні не мають вербальної форми.

Для виявлення таких знань зазвичай використовують підходи, пов'язані з аналізом поведінки процесів або об'єктів та подальшою формалізацією закономірностей такої поведінки.

Поведінка бізнес-процесів фіксується інформаційною системою процесного управління у вигляді логів (журналів подій). Кожен журнал містить декілька наборів подій. Кожен набір фіксує одну реалізацію бізнес-процесу. Опис події логу містить інформацію про дію процесу та контекстні умови виконання цієї дії, що дозволяє визначити причинно-наслідкові залежності між діями та умовами запуску цих дій.

Таким чином, представлення знань інформаційної системи процесного управління повинно враховувати представлені в логах особливості поведінки знання-ємного бізнес-процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ключова відмінність знання-ємних бізнес-процесів полягає в тому, що при їх адаптації використовуються неявні патерни управління та обмеження, які є відображення персонального досвіду виконавців і не завжди входять до складу його моделі [4, 5].

Безпосереднє включення цих патернів до моделі процесу потребує значних витрат на перебудову і переконфігурацію моделі.

Для того, щоб враховувати додаткові залежності при управлінні ЗБП, доцільно виділити відповідні знання і представити їх у формальному вигляді в рамках бази знань з тим, щоб використовувати цю базу для підтримки прийняття рішень [6].

Такі знання повинні враховувати причинно-наслідкову та ймовірнісну складові [7–11]. Однак підходи до представлення знань, що поєднують ці аспекти, не враховують розглянуті особливості процесного управління, а також форму представлення інформації про поведінку бізнес-процесів.

Зазначене свідчить про важливість розробки представлення знань для інформаційної системи процесного управління з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків, інформація про які представлена у логах бізнес-процесів підприємства.

**Метою даної статті** є розробка представлення знань для відображення причинно-наслідкових зв'язків між контекстом виконання дій та діями бізнес-процесу із можливістю врахування ймовірнісної складової для того, щоб забезпечити автоматизовану побудову бази знань на основі аналізу логів системи процесного управління.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- уточнення структури представлення причинно-наслідкового аспекту знань у відповідності до особливостей логу інформаційної системи процесного управління;
- побудова логічних фактів і правил у відповідності до структури подій логу;
- формалізація представлення знань з урахуванням фактів, правил та апріорних обмежень.

**Структуризація представлення знань в інформаційній системі процесного управління.** Запропоноване представлення знань базується на використанні марковських логічних мереж. Такі мережі дозволяють поєднати логічний та ймовірнісний опис знань. Дана робота присвячена опису логічної складової представлення знань.

Логічна складова такого представлення оперує константами, змінними, функціями та предикатами.

Константи відображають об'єкти предметної області. Сукупність таких об'єктів складає контекст виконання бізнес-процесу.

Зазвичай об'єкти, з якими взаємодіє процес, називають артефактами. В якості артефактів, як правило, розглядають документи, деталі, матеріали, станки, програми, тощо. Артефакти є типізованими, тобто розбиваються на множини, які відповідають різним типам об'єктів.

Змінна дозволяє відобразити підмножину об'єктів відповідного типу.

Функція дозволяє відобразити одну множину об'єктів на іншу. Так, наприклад, формується ієрархія артефактів контексту бізнес-процесу.

Предикати задають зв'язки між об'єктами або визначають атрибути об'єктів.

Властивості артефактів відображені в журналі подій бізнес-процесу в якості атрибутів.

Лог містить у собі множини послідовностей подій, що відображають відомі варіанти поведінки бізнес-процесу [12]. Фрагмент логу із двох послідовних подій представлено на рис. 1.

```

<event>
  <string key=" org:group " value="L40 3rd"/>
  <string key=" resource country " value="France"/>
  <string key=" organization country " value="fr"/>
  <string key=" org:resource" value ="Sophie"/>
  <string key=" organization involved " value="Org line A2"/>
  <string key=" org:role " value="D_1"/>
  <string key=" concept:name " value="Accepted"/>
  <string key=" impact" value ="Low"/>
  <string key=" product" value ="PROD609"/>
  <string key="lifecycle:transition" value="Wait - User"/>
  <date key="time:timestamp" value="2012-05-14T11:04:30+02:00"/>
</event>
<event>
  <string key="org:group" value="L40 3rd"/>
  <string key="resource country" value="France"/>
  <string key="organization country" value="fr"/>
  <string key="org:resource" value="Sophie"/>
  <string key="organization involved" value="Org line A2"/>
  <string key="org:role" value="D_1"/>
  <string key="concept:name" value="Completed"/>
  <string key="impact" value="Low"/>
  <string key="product" value="PROD609"/>
  <string key="lifecycle:transition" value="Resolved"/>
  <date key="time:timestamp" value="2012-05-14T11:04:40+02:00"/>
</event>

```

Рис. 1. Фрагмент логу бізнес-процесу сервісного обслуговування підприємства VolvoIT із двох подій

Подія (event) характеризує стан артефактів контексту в момент її виникнення. Цей стан задається через значення атрибутів події.

Атрибути події еквівалентні атрибутам артефактів, як показано на рис. 2. Тобто зв'язок між артефактами контексту та подіями логу бізнес-процесу здійснюється через спільні атрибути. Відповідно, як між артефактами й атрибутами так і між подіями та атрибутами існує відношення 1:М (один до багатьох).

Таким чином, властивості події можуть бути безпосередньо відображені на властивості артефактів. Єдина відмінність події полягає у наявності мітки часу, коли виникла подія. Мітка має такий вигляд: "date key="time:timestamp" value = "2012-05-14 T11:04:30+02:00".

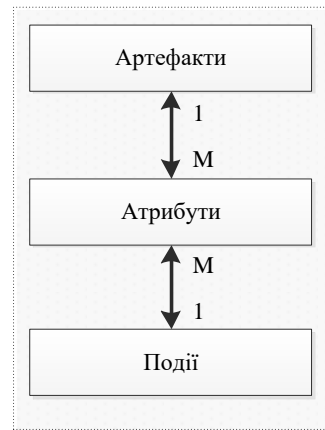


Рис. 2. Зв'язок між артефактами контексту та подіями логу бізнес-процесу

Ми можемо узагальнити події в базі знань, віднісши їх до окремого типу із властивістю у вигляді константи часу.

В цілому, з точки зору користувача бази знань, логічна складова поєднує множини логічних фактів та множини правил виводу на цих фактах, як показано на рис. 3.

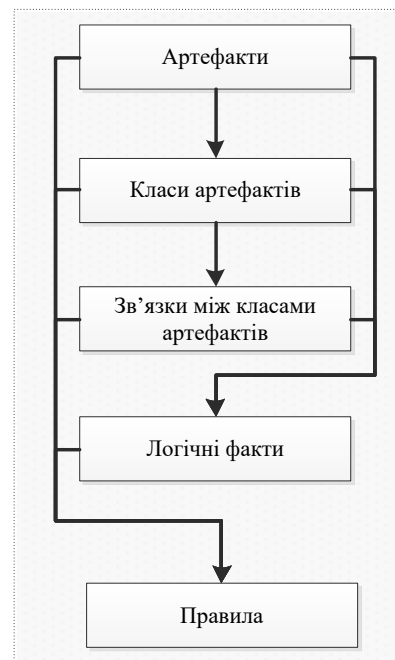


Рис. 3. Структура представлення знань

Логічні факти визначають стан бізнес-процесу у дискретні моменти часу на основі значень властивостей артефактів та представлені у вигляді предикатів із заданими значеннями аргументів. Правила виводу визначають зміну стану бізнес-процесу.

Шаблони для логічних фактів є залежності між класами артефактів. Істинність логічних фактів визначається після підставлення значень конкретних артефактів та їх властивостей у цей шаблон.

Логічні правила задають шаблони, що зв'язують контекст та виконані дії бізнес-процесу як показано на рис. 4.

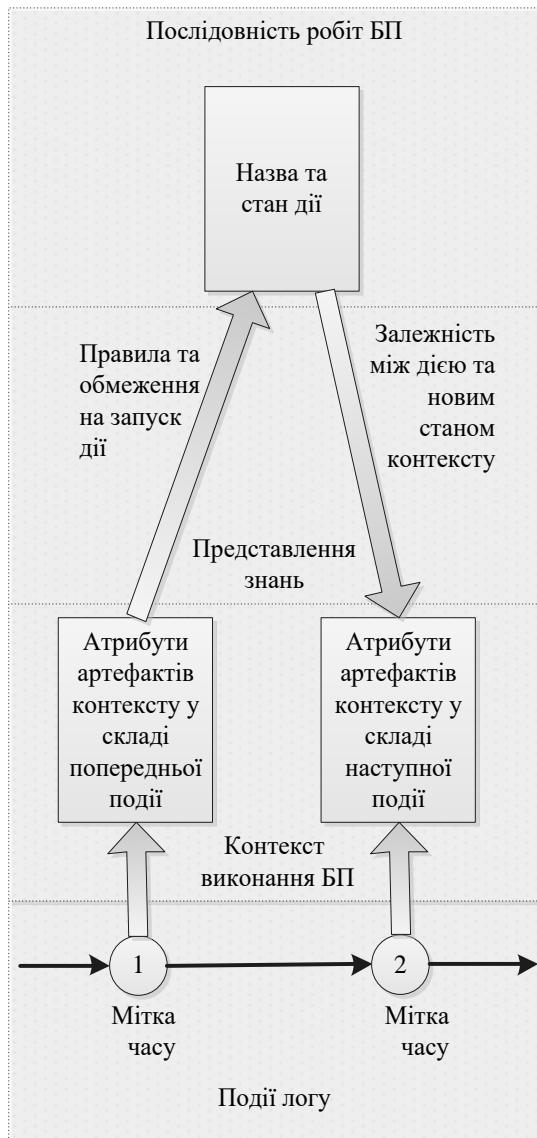


Рис. 4. Зв'язок між подіями журналу бізнес-процесу, артефактами контексту, представленням знань та діями БП

Ймовірнісна складова призначена для представлення невизначеності логічних фактів та правил виводу щодо цих фактів.

Невизначеність реалізується шляхом призначення ваг логічним фактам та правилам виводу.

**Побудова логічних фактів і правил у відповідності до структури подій журналу.** Розглянемо опис логічних фактів та правил на прикладі фрагменту журналу подій на рис. 1.

Для першої події, зокрема, вказано такі значення атрибутів:

- атрибут з назвою дії процесу "*concept : name*" має значення "*Accepted*", тобто виконується дія з прийняття заявки на сервісне обслуговування;

- атрибут з назвою стану дії процесу "*lifecycle : transition*" має значення "*Wait – User*",

тобто в момент виникнення події очікується реакція користувача.

Тоді логічний факт, що поточний стан дії процесу (*lifecycle : transition*) становить "*Wait – User*" для дії "*Accepted*" має вигляд:

$$lifecycle : transition ("Accepted", "Wait – User"), 0,65. \quad (1)$$

Ймовірнісна складова відображена у вигляді ваги. Вага даного факту для всіх подій журналу, що відображають стан дії "*Accepted*", становить 0,65. Чим вище ця вага, тим більшою є ймовірність наведеного факту.

В даному прикладі ми розширюємо поняття «артефакт» не лише на об'єкти, з якими оперує процес, але і на дії БП.

Це узагальнення не порушує наведену на рис. 4 структуру знання-смого бізнес-процесу. Така структура містить у собі послідовність робіт, представлення знань та контекст виконання дій ЗБП.

Поточний стан контексту, що впливає на вибір послідовності дій виконавцем, залежить не тільки від властивостей та стану документів, деталей, вузлів, які використовує процес, але й від поточного стану дії, яку цей БП виконує.

Узагальнений логічний факт (1) представимо у вигляді відношення, що встановлює зв'язки між елементами множини  $D'$ , яка містить підмножину дій бізнес-процесу та підмножини  $S'$  можливих станів цих дій:

$$lifecycle : transition(d \in D', s \in S') = \begin{cases} true \\ false \end{cases}, \quad (2)$$

де  $d$  – назва дії бізнес-процесу;

$s$  – назва стану дії бізнес-процесу.

Правила виводу визначають зв'язки між логічними фактами. У відповідності до схеми на рис. 4 ми вводимо два типа правил:

- правила та обмеження на виконання дії, що визначають залежність між станом контексту (антецедент) та діями процесу (консеквент);

- залежності між виконаною дією та станом контексту.

Перше правило для журналу на рис. 1 має вигляд (3). Дане правило будується на описі першої дії журналу, тобто індекси і атрибутів артефактів і дії та її стану мають індекс 1. Відзначимо, що у виразі (3) для наглядності деталізовано логічні факти антецеденту та консеквенту

Зазвичай перелік атрибутів є ідентичним для всіх подій журналу. Тому антецедент даного правила відповідає будь-якій події журналу.

Друге правило має вигляд (4).

Опис множин підрозділів, виконавців, країн, тощо, є аналогічним опису для виразу (3). Верхній індекс 2 для цих множин свідчить про їх відповідність другій події журналу.

$$\left( \begin{array}{l} org : group(gr \in Gr^1) \wedge \\ resource\ country(rc \in Rc^1) \wedge \\ organization\ country(oc \in Oc^1) \wedge \\ org : resource(rs \in Rs^1) \wedge \\ organization\ involved(org \in Org^1) \wedge \\ org : role(rl \in Rl^1) \wedge \\ impact(im \in Im^1) \wedge product(pr \in Pr^1) \end{array} \right) \quad (3)$$

$$\rightarrow \left( \begin{array}{l} lifecycle : transition(d \in D^1, s \in S^1) \wedge \\ concept : name(d \in D^1) \end{array} \right),$$

$$w^1,$$

Де  $w^1$  – вага даного правила;

$Gr^1$  – множина груп (або підрозділів) виконавців першої дії;

$Rc^1$  – множина країн, що надають ресурси для першої дії;

$Oc^1$  – країни, в якій працюють підприємства з цим БП;

$Rs^1$  – множина допустимих виконавців дії;

$Org^1$  – множина можливих залучених організацій;

$Rl^1$  – множина можливих ролей виконавця;

$Im^1$  – множина можливих рівнів важливості дії;

$Im^1$  – множина продуктів, які обробляються при виконанні цієї дії;

$D^1$  – множина можливих назв дії  $d$ ;

$S^1$  – множина можливих станів дії  $d$ .

Перше правило задає як умови для запуску дії або зміни стану  $d \in D^1$ , так і обмеження при виконанні дії. Відмінність між ними полягає у значенні ваги  $w^1$ . У випадку, якщо вага формули дорівнює  $\infty$ , то дане правило виступає в якості обмеження.

$$\left( \begin{array}{l} lifecycle : transition(d \in D^1, s \in S^1) \wedge \\ concept : name(d \in D^1) \end{array} \right) \quad X$$

$$\left( \begin{array}{l} org : group(gr \in Gr^2) \wedge \\ resource\ country(rc \in Rc^2) \wedge \\ organization\ country(oc \in Oc^2) \wedge \\ org : resource(rs \in Rs^2) \wedge \\ organization\ involved(org \in Org^2) \wedge \\ org : role(rl \in Rl^2) \wedge \\ impact(im \in Im^2) \wedge product(pr \in Pr^2) \end{array} \right) \quad (4)$$

$$\rightarrow w^2,$$

де  $w^2$  – вага даного правила.

Друге правило задає перехід від першої до другої події при виконанні бізнес-процесу. Правило пов'язує логічні факти, що визначають попередній стан  $lifecycle : transition$  дії  $concept : name$ , та наступний стан контексту, який охоплює групу виконавців  $org : group$ , країну  $resource\ country$  та  $organization\ country$ , ім'я виконавця дії  $org : resource$ , роль виконавця у бізнес-процесі  $org : role$ , важливість дії для бізнес-процесу  $impact$ , та продукт, який обробляє бізнес-процес  $product$ .

**Представлення знань з урахуванням фактів, правил та апіорних обмежень.** Для послідовності дій бізнес-процесу задаються також наступні загальні обмеження.

По-перше, і в антецеденті і консеквентні може бути представлена одна дія, яка просто змінює свій стан:

$$D^1 \cap D^2 \neq \emptyset \Rightarrow D^1 \cap D^2 = d, \quad (5)$$

де  $D^1, D^2$  – множини допустимих дій, що відповідають першій та другій події;  
 $d$  – дія, що записана в обох подіях логу.

По-друге, послідовність зміни станів на трасі логу розглядатимемо як ациклічну (що є дійсним у більшості випадків), тобто:

$$S^1 \cap S^2 = \emptyset \mid D^1 \cap D^2 = d, \quad (6)$$

де  $S^1, S^2$  – множини допустимих станів дій, що відповідають першій та другій події;

Таким чином, представлення знань інформаційної системи процесного управління у її логічному аспекті має такий вигляд:

$$KB = \left\{ \begin{array}{l} \{(f_i, w_i)\}, \{(r_j, w_j)\} \\ |\forall f_i \exists \{af_k\} : f_i(\{af_k\}) = \{true, false\} \wedge \\ \forall r_j \exists \{f_i\} : r_j(\{f_i\}) = \{true, false\} \wedge C \end{array} \right\}, \quad (7)$$

де  $f_i$  – логічний факт;

$w_i$  – вага логічного факту  $f_i$ ;

$f_i$  – правило;

$w_j$  – вага правила  $r_j$ ,  $0 \leq w_j \leq \infty$ ;

$af_k$  – артефакт контексту виконання бізнес-процесу;

$C$  – апіорні знання про предметну область, що задають узагальнені обмеження на правила.

У відповідності до виразу (7), правила в базі знань оперують фактами, які визначаються на основі артефактів контексту БП. В свою чергу, артефакти визначаються своїми властивостями, представленими в описі подій логу, як було показано у прикладі (1).

**Висновки.** Розглянуто побудови представлення знань в системі процесного управління в аспекті відображення причинно-наслідкових

зв'язків між контекстом виконання дій та діями бізнес-процесу.

Запропоновано представлення знань, що враховує стан контексту виконання дій бізнес-процесу у вигляді зважених логічних фактів, а також зважених правил виводу, які забезпечують підтримку вибору дій з урахуванням поточного стану контексту. Відмінність запропонованого представлення полягає в тому, що при визначенні фактів враховуються атрибути подій, а правил – атрибути дій та послідовність подій логічного бізнес-процесу.

Практичне значення представлення знань полягає у можливості автоматизованої побудови причинно-наслідкових залежностей між діями бізнес-процесу для бази знань системи процесного управління. Вказані залежності формуються у відповідності до атрибутів та послідовності подій його логічного.

#### Список літератури

1. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2013. 391 p.
2. Van Der Aalst W. M. P. *Business Process Management: A Comprehensive Survey*. *ISRN Software Engineering*. 2013. P. 1–37.
3. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 403 p.
4. Gronau N. *Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL: Comprehensive insights into theory and practice*. Gito, 2012. 522 p.
5. El-Den J. A. *Tacit knowledge externalization among geographically distributed small groups*. *PhD Thesis's*. University of Technology, Sydney, Australia, 2009. 323 p.
6. Bollacker K., Evans C., Paritosh P., Sturge T., Taylor J. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge. *SIGMOD/PODS '08 International Conference on Management of Data*. New York, NY, USA, 2008. P. 1247–1250.
7. Kollar D., Friedman N. *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. The MIT Press, 2009. 1270 p.
8. Singla P., Domingos P. Entity resolution with Markov logic. *6th International Conference on Data Mining (ICDM)*, 2006. P. 572–582.
9. Huynh T. N., Mooney R. J. Discriminative structure and parameter learning for markov logic networks. *Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML)*. Helsinki, Finland, 2008. P. 416–423.

10. Kok S., Domingos P. Learning markov logic networks using structural motifs. *SIGMOD/PODS '10 International Conference on Management of Data*. New York, NY, USA, 2010. P. 551–558.
11. Richardson M., Domingos P. Markov logic networks. *Machine learning*, 2006. № 62(1–2). P.107–136.
12. Acampora G., Vitiello A., Stefano B. Di, Van Der Aalst W. M. P., Günther C. IEEE 1849: The XES Standard - The Second IEEE Standard Sponsored by IEEE Computational. *Intelligence Society. IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2017. Vol 12 (2). P 4–8.

#### References (transliterated)

1. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2013. 391 p.
2. Van Der Aalst W. M. P. *Business Process Management: A Comprehensive Survey*. *ISRN Software Engineering*. 2013. pp. 1–37.
3. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 403 p.
4. Gronau N. *Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL: Comprehensive insights into theory and practice*. Gito, 2012. 522 p.
5. El-Den J. A. *Tacit knowledge externalization among geographically distributed small groups*. *PhD Thesis's*. University of Technology, Sydney, Australia, 2009. 323 p.
6. Bollacker K., Evans C., Paritosh P., Sturge T., Taylor J. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge. *SIGMOD/PODS '08 International Conference on Management of Data*. New York, NY, USA, 2008. pp. 1247–1250.
7. Kollar D., Friedman N. *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. The MIT Press, 2009. 1270 p.
8. Singla P., Domingos P. Entity resolution with Markov logic. *6th International Conference on Data Mining (ICDM)*, 2006. pp. 572–582.
9. Huynh T. N., Mooney R. J. Discriminative structure and parameter learning for markov logic networks. *Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML)*. Helsinki, Finland, 2008. pp. 416–423.
10. Kok S., Domingos P. Learning markov logic networks using structural motifs. *SIGMOD/PODS '10 International Conference on Management of Data*. New York, NY, USA, 2010. pp. 551–558.
11. Richardson M., Domingos P. Markov logic networks. *Machine learning*, 2006, № 62(1–2), pp.107–136.
12. Acampora G., Vitiello A., Stefano B. Di, Van Der Aalst W. M. P., Günther C. IEEE 1849: The XES Standard - The Second IEEE Standard Sponsored by IEEE Computational. *Intelligence Society. IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2017, vol 12, issue 2. pp. 4–8.

Надійшла (received) 05.06.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Левикін Віктор Макарович (Левыкин Виктор Макарович, Levykin Victor Makarovich)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7929-515X>; e-mail: [levykinvictor@gmail.com](mailto:levykinvictor@gmail.com)

**Чала Оксана Вікторівна (Чалая Оксана Викторовна, Chala Oksana Viktorivna)** – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8265-2480>; e-mail: [oksana.chala@nure.ua](mailto:oksana.chala@nure.ua)

*Г. Ю. СИДОРЕНКО, М. М. МАЛЬКО, М. А. ЛЯШЕНКО*

## **ВИКОРИСТАННЯ SERVERLESS ПІДХОДУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВЕБ-ДОДАТКУ МОНІТОРИНГУ ТОВАРІВ**

Використовуються сучасні підходи до організації веб-застосунків. Аналіз проблемної області проведено на прикладі оцінки моніторингу зміни вартості товарів в інтернет-магазинах з використанням технології Amazon. В роботі проведено огляд та аналіз сучасних методів організації веб-застосувань. Також була досліджена тематична область електронної торгівлі, проведено порівняльний аналіз. Технології розробки веб-додатків розвиваються великими темпами, створюються нові способи організації, технології, мови програмування. Основою всіх сучасних додатків є його архітектура. Від вибору правильної архітектури залежить не тільки швидкість і зручність доступу та розробки, а й успіх продукту. Було зроблено припущення про доцільність створення системи, що могла б швидко та зручно проводити моніторинг та нотифікування користувача. В роботі для вирішення задачі моніторингу було запропоновано використовувати архітектуру serverless. Серверна частина системи базується на безсерверній архітектурі, що має низку переваг перед іншими підходами. У роботі був обраний даний підхід не тільки для організації веб-сервісу, прив'язаного до призначеного для користувача інтерфейсу, але і для створення непостійної архітектури збору даних з різних джерел. Основними причинами вибору цього напрямку є можливість створення серверної архітектури на обмежений час без постійного використання і можливість стабільної роботи незалежно від навантаження. В результаті була побудована гнучка і зручна система, що має змогу слідувати за вартістю товару без участі користувача та надсилати сповіщення про вдалу покупку. Система зберігає мінімальну кількість даних про користувача, чим досягається ще більша безпека користування. Під час моніторингу, якщо правило відстеження буде виконано, система відправить повідомлення користувачу за допомогою електронного листа.

**Ключові слова:** інтернет-магазин, безсерверна архітектура, моніторинг, вартість, алгоритм, on-line режим.

*А. Ю. СИДОРЕНКО, М. Н. МАЛЬКО, Н. А. ЛЯШЕНКО*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SERVERLESS ПОДХОДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ МОНИТОРИНГА ТОВАРОВ**

Используются современные подходы к организации веб-приложений. Анализ проблемной области проведен на примере оценки мониторинга изменения стоимости товаров в интернет-магазинах с использованием технологии Amazon. В работе проведен обзор и анализ современных методов организации веб-приложений. Также была исследована тематическая область электронной торговли, проведен сравнительный анализ. Технологии разработки веб-приложений развиваются большими темпами, создаются новые способы организации, технологии, языки программирования. Основой всех современных приложений является его архитектура. От выбора правильной архитектуры зависит не только скорость и удобство доступа разработки, но и успех программного продукта. Было сделано предположение о целесообразности создания системы, которая могла бы быстро и удобно проводить мониторинг и нотифицирование пользователя. В работе для задачи мониторинга предложено использовать архитектуру serverless. Серверная часть системы базируется на бессерверной архитектуре, которая имеет ряд преимуществ перед другими подходами. В работе был выбран данный подход не только для организации веб-сервиса, привязанного к пользовательскому интерфейсу, но и для создания непостоянной архитектуры сбора данных из различных источников. Основными причинами выбора этого направления является возможность создания серверной архитектуры на ограниченное время без постоянного использования и возможность стабильной работы независимо от нагрузки. В результате была построена гибкая и удобная система, которая имеет возможность следить за стоимостью товара без участия пользователя и отправлять уведомление о достижении заданного критерия к стоимости товаров. Система сохраняет минимальное количество данных о пользователе, чем достигается большая безопасность использования. Во время мониторинга, если правило отслеживания будет выполнено, система отправит сообщение пользователю с помощью электронной почты.

**Ключевые слова:** интернет-магазин, бессерверная архитектура, мониторинг, стоимость, алгоритм, on-line режим.

*G. Y. SYDORENKO, M. M. MALKO, M. A. LYASHENKO*

## **USING THE SERVERLESS APPROACH FOR THE CREATING WEB-APPLICATION OF THE MONITORING OF PRODUCTS**

There have been using modern approaches to the organization of web applications. The analysis of the problem area was carried out using the example of monitoring the change in the value of goods in online stores using Amazon technology. The article has been reviewing and analyzing of modern methods of organizing web applications. The thematic area of the electronic commerce was also investigated, and a comparative analysis was carried out. Technologies for developing web-applications are developing at a rapid pace, new methods of organization, technologies, programming languages are being created. The basis of all modern applications is its architecture. Not only the speed and convenience of development access, but also the success of the software product, depends on choosing the right architecture. It was suggested that it would be advisable to create a system that could quickly and conveniently monitor and notify a user. In the work for the monitoring task, it was suggested to use the serverless architecture. The server part of the system is based on a serverless architecture, which has a number of advantages over other approaches. In this article, this approach was chosen not only for organizing a web service tied to the user interface, but also for creating a non-persistent architecture for collecting data from various sources. The main reasons for choosing this direction is the possibility of creating a server architecture for a limited time without constant use and the possibility of stable operation regardless of the load. As a result, a flexible and convenient system was built that has the ability to monitor the value of the product without user intervention and send a notification of the achievement of a given criterion to the value of the goods. The system saves a minimum amount of user data, thus achieving greater safety of use. During monitoring, if the tracking rule is met, the system will send a message to the user using e-mail.

**Keywords:** online store, serverless architecture, monitoring, cost, algorithm, on-line mode

**Вступ.** У сучасному світі вплив технологій на всі аспекти життя є дуже високим. Не зважаючи на велику кількість online-магазинів та достатній проміжок часу для їх розвитку, робота з таким магазином не проста. Однією із причин є дуже велика

швидкість змін вартості та кількості товарів. Саме тому поліпшення швидкості і якості користування має неабияку роль [1].

Інтернет-магазин – це форма електронної комерції, яка дозволяє споживачам купувати товари або

послуги безпосередньо від продавця через Інтернет за допомогою веб-браузера [2]. Споживачі знаходять продукт, що представляє інтерес, відвідавши безпосередньо веб-сайт продавця або шукаючи серед альтернативних постачальників, використовуючи пошукову систему покупок, яка відображає наявність та вартість одного і того ж продукту у різних електронно-роздрібних продавців. Типовий інтернет-магазин дає змогу клієнту переглядати спектр продуктів та послуг фірми, переглядати фотографії або зображення продуктів, а також інформацію про технічні характеристики, особливості та ціни. Магазины, зазвичай, дозволяють покупцям використовувати функції пошуку конкретних моделей, брендів або предметів. Для фізичних продуктів (наприклад, книжок або одягу) продавець відправляє продукти клієнту, а для цифрових продуктів, таких як цифрові аудіофайли пісень або програмне забезпечення, продавець зазвичай надсилає файл клієнту через Інтернет.

Однією з проблем, які можна не побачити відразу, є проблема зміни вартості продукту. Ціни на товари формуються неоднорідно і не мають прямого чи єдиного чинника впливу. Спершу, можна сказати, що основою для вартості продукту є фактична ціна виробництва та додаткова вартість, що є прибутком продавця, але це не так. Покупцю важно почувати себе у вигірній ситуації, бо ціни постійно змінюються. У сучасному світі є велика кількість знижок, що можуть мати різні причини [3]:

- 1) акційні знижки на товари певного магазину;
- 2) знижки на сезонні товари;
- 3) специфічні знижки за даною категорією;
- 4) персональні знижки;
- 5) знижки на товари з пошкодженою упаковкою.

Тому дослідження методів моніторингу вартості продуктів та побудова сучасної зручної системи для поліпшення роботи користувачів має великий інтерес.

Не зважаючи на велику кількість різних знижок, покупець може знати про період дії знижки, проте знижка може бути і в деякий невеликий період. Також не зрозуміло, коли знижка почнеться і скільки годин вона буде діяти. До того ж покупці великих інтернет-магазинів можуть знаходитися у різних частинах світу. Все це є причиною того, що велика кількість знижок може пройти повз користувача. Саме тому важливим є процес моніторингу ціни на товари, які користувач хоче придбати. З іншого боку, знаходження користувача на сайті постійно, не є дуже зручним процесом. Саме тому, не менш важливим є надання нотифікацій користувачу з використанням електронних листів або інших видів нотифікацій.

Метою даної роботи є дослідження методів моніторингу вартості продукції та побудова сучасної зручної системи моніторингу на базі безсерверної архітектури.

**Сучасні способи організації архітектури.** Технології розробки веб-додатків розвиваються високими темпами, створюються нові способи організації, технології, мови програмування [4]. Однак, основою всіх сучасних додатків є архітектура.

Від вибору правильної архітектури залежить не тільки швидкість і зручність доступу та розробки, а й успіх продукту.

Проведемо ознайомлення з сучасними способами організації архітектури веб-додатків, їх порівняння і аргументований вибір архітектури для розробки програмного продукту. Спочатку, найбільш використовуваним підходом була монолітна архітектура, що дозволяє будувати величезні додатки, які складаються з безліч функціональних частин в рамках однієї великої структури. Одним з основних переваг цього підходу є незалежність від будь-яких сторонніх ресурсів на користь організації всього продукту в рамках однієї програми [5].

На зміну монолітної архітектури прийшов мікросервісний підхід. У ньому використовується абсолютно інша стратегія організації. В даній архітектурі широко застосовуються різні сторонні сервіси, програма містить кілька невеликих компонент, кожен з яких є окремим веб-додатком. Ці компоненти взаємопов'язані між собою. Кожному компоненту даної архітектури відповідає певна роль у функціонуванні програми. Основною перевагою даного підходу є зручність і гнучкість додатків, що дозволяє вдаватися до масштабування окремих компонент [4, 5]. На даний момент даних підхід є найбільш популярним.

Serverless (безсерверна архітектура) є підходом до організації архітектури веб-додатків, що активно набирає популярність (рис. 1). Взавши всі переваги мікросервісного підходу, безсерверний підхід має відсутність будь-якої апаратної частини в організації веб-додатків [6].

### Serverless applications

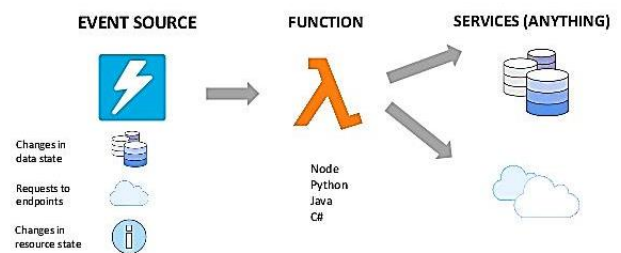


Рис. 1. Схема безсерверної архітектури

Serverless має як ряд переваг, так і деякі недоліки. Перевагами даного підходу є:

- 1) відсутність апаратної частини – серверів;
- 2) відсутність прямого контакту і адміністрування серверної частини;
- 3) практично безмежне горизонтальне масштабування додатку.

До недоліків даного підходу можна віднести:

- 1) відсутність чіткого контролю за виконанням програми;
- 2) відсутність цілісності додатка;
- 3) холодний старт може займати кілька секунд, що негативно сприймається користувачем [7].

В цілому даний підхід є досить придатним для вирішення завдань певного роду в рамках великого

дodatка або для початкових етапів розробки. Особливий акцент в даному випадку ставиться на незалежність від серверної інфраструктури і безмежний приріст продуктивності в автоматичному режимі.

Одночасно з безсерверною архітектурою вводиться поняття FaaS (Function-as-a-Service, функція як сервіс), що характеризується підходом до розбиття сервісів на найменші функціональні частини спільно з відокремленням цих частин в окремі функціональні одиниці. Наприклад, веб-сервіс розбивається на окремі шляхи і для кожного такого шляху створюється окрема функція, яка викликається при кожному зверненні до нього. Також, безсерверні системи набагато простіше підтримувати, більш того, будь-яка оптимізація продуктивності FaaS-дodatку автоматично знижує операційні витрати [8].

У роботі був обраний даний підхід не тільки для організації веб-сервера прив'язаного до призначеного для користувача інтерфейсу, але й для створення непостійної архітектури збору даних з різних джерел. Основними причинами вибору цього напрямку є можливість створення серверної архітектури на обмежений час без постійного використання і можливість стабільної роботи незалежно від навантаження.

**Огляд моделі веб-застосунку.** Беручи до уваги усі вищезазначені дослідження та аналіз сучасних підходів, було вирішено створити програмну модель, яка б вирішувала проблеми моніторингу та мала б за основу безсерверну архітектуру. На рис. 1 зображена повна модель серверної частини веб-застосунку.

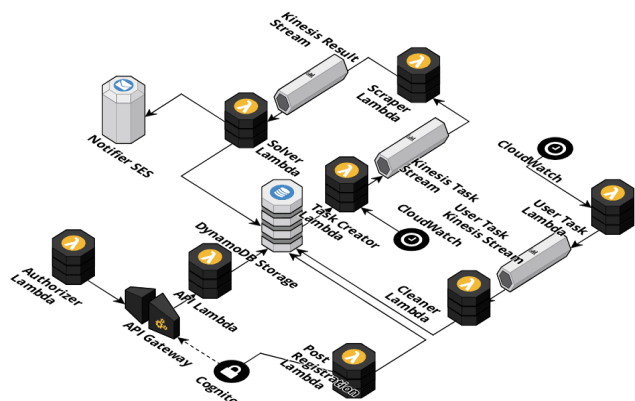


Рис. 1. Діаграма серверної частини веб-застосунку

На рис. 1 можна побачити, що веб-застосунок можна уявно поділити на три окремі частини: частину веб-сервісу, частину слідкування за ціною продукції, допоміжну частину для моніторингу за використанням користувачем доцільної кількості ресурсів в залежності від його типу акаунта.

На рис. 2 представлено частину веб-сервісу. Веб-сервіс відіграє дуже важливу роль у застосунку. Він використовується для зв'язку між користувачем та системою моніторингу. Вся робота користувача з системою проводиться через веб-сервіс. На рис. 2 можна спостерігати, що ця частина також має декілька складових: API Gateway, Authorizer Lambda, API

Lambda, Cognito, Post Registration Lambda та DynamoDB Storage [9, 10].

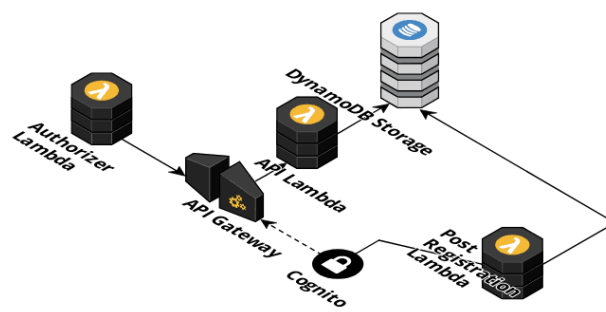


Рис.2. Діаграма частини веб-сервісу

Другою частиною веб-застосунку є частина моніторингу вартості продукції. Схема цієї частини представлена на рис. 3. Частина моніторингу є найбільш важливою у роботі застосунку. Вона виконує автоматичну роботу без участі користувача. Таким чином досягається можливість позбавлення користувача необхідності постійно слідкувати за вартістю продукції та, навіть, проводити час за комп'ютером. Це досягається за допомогою об'єднання багатьох сервісів Amazon [11, 12]. Дивлячись на діаграму можна побачити, що частина моніторингу також має декілька складових: DynamoDB Storage, CloudWatch, Task Creator Lambda, Kinesis Task Stream, Scraper Lambda, Kinesis Result Stream, Solver Lambda та Notifier SES.

Іншою складовою є CloudWatch. Amazon CloudWatch – це сервіс моніторингу хмарних ресурсів AWS і додатків, які запускаються за їх допомогою. Amazon CloudWatch можна використовувати для збору і відстеження метрик, накопичення та аналізу файлів журналів, створення попереджень, а також автоматичного реагування на зміни ресурсів AWS [13]. Також цей сервіс можна застосовувати для отримання зведеної інформації про систему, що включає в себе інформацію про ресурси, які використовуються, а також продуктивність додатків і загальний стан системи. Ці дані застосовуються для оперативного реагування та забезпечення стабільної роботи додатків.

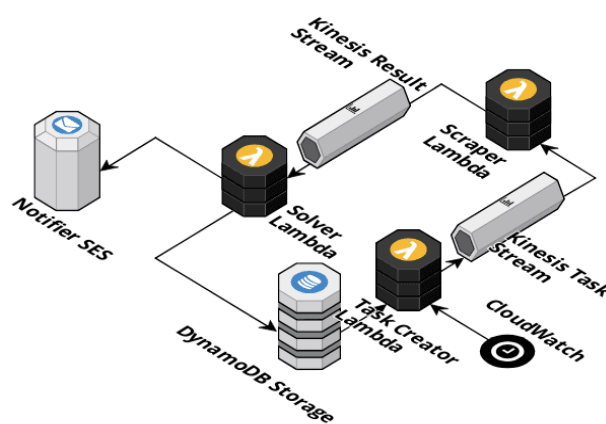


Рис.3. Діаграма частини моніторингу



Використана система сервісів дозволяє кожній годині проводити моніторинг будь-якої кількості товарів та проводити нотифікування користувачів про зміни товарів.

Останньою частиною є допоміжна частина для слідування за використанням користувачем доцільної кількості ресурсів в залежності від його типу аккаунту. У сервісі присутні 5 видів аккаунтів, що дозволяють користувачу виконувати моніторинг різної кількості продукції у місяць.

На рис. 4 представлена діаграма допоміжної частини. З огляду на те, що кількість товарів для моніторингу обмежена, кожний місяць допоміжна частина користувачів виконує роль очищення бази даних від записів про кількість товарів, що була використана. Ця частина має такі складові: DynamoDB Storage, Cleaner Lambda, User Task Kinesis Stream, User Task Lambda та CloudWatch. Кожного місяця CloudWatch створює подію, яка визначає момент, коли треба провести очищення бази.

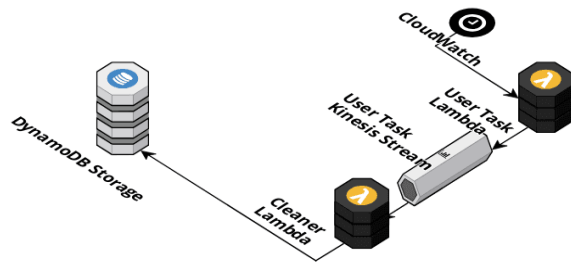


Рис.4. Діаграма допоміжної частини веб-сервісу

User Task Lambda створює низку завдань для виконання та вкладає їх у User Task Kinesis Lambda. Cleaner Lambda реагує на наявність завдань та проводить зазначені вище дії [8, 9]. Візуальна частина виконана за допомогою фреймворка React та системи станів Redux [12]. Як хостинг та для зменшення витрат на основі декількох сервісів Amazon була створена система, схему якої можна побачити на рис. 5.

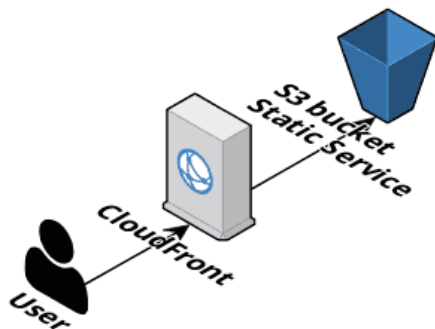


Рис.5. Діаграма візуального сервісу

З рис. 5 можна зробити висновок, що візуальна частина складається з двох складових: CloudFront та S3 Bucket Static Service. В роботі S3 використовується саме як сервіс статичних даних разом з CloudFront, проте також використовуються усі вищезазначені переваги.

**Основні результати роботи.** Спираючись на принципах та архітектурі, описаних вище, було створено веб-застосунок для моніторингу вартості продукції на баз архітектури serverless. На рис. 6 зображена загальна структура веб-застосунку.

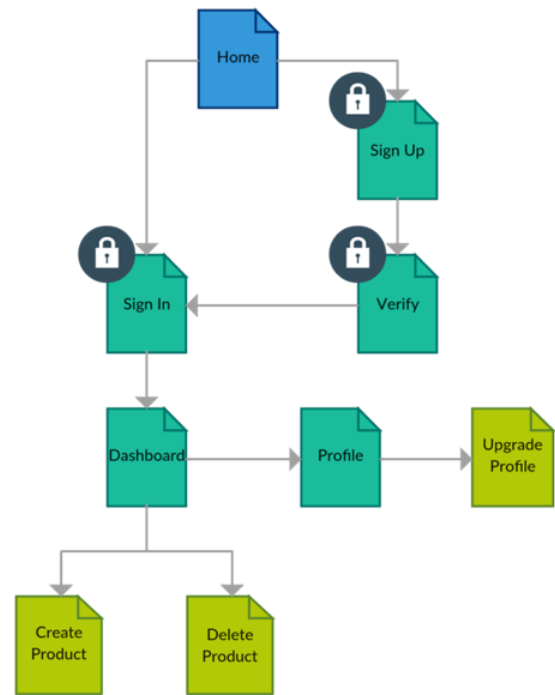


Рис. 6. Загальна структура веб-застосунку

Після авторизації користувача виконується запит до Amazon Cognito, який збереже введені дані до бази, якщо вони відповідають вимогам безпеки. Після збереження даних Cognito створює системний лист до користувача з кодом верифікації поштової адреси та наміру реєстрації у той час, коли веб-застосунок перенесе користувача на сторінку верифікації та запропонує ввести код. Після введення коду виконується спеціальний запит до Amazon Cognito з метою верифікації та активації користувача за наявності вірного коду. Після успішної верифікації веб-застосунок перенесе користувача на сторінку автентифікації.

У випадку правильно введених даних користувача система перенесе його на основну сторінку зі списком товарів, що вже є зареєстрованими для моніторингу (приклад, рис. 7).

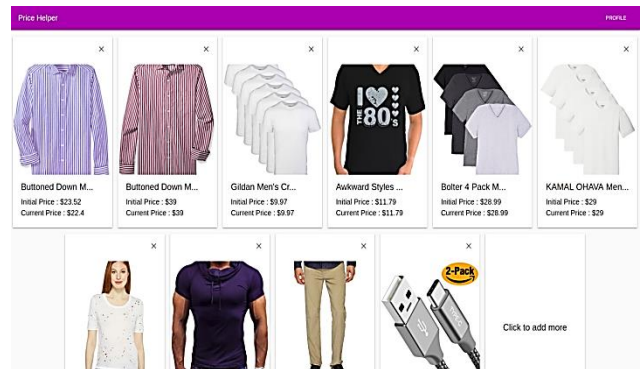


Рис. 7. Приклад основної сторінки користувача

Товари розподіляються рівномірно по сторінці. У веб-застосунку присутня можливість видалити непотрібний товар або додати новий товар. Додавання нового товару виконується у два кроки. На першому кроці користувач має ввести посилання на товар, що він бажає додати. На другому кроці система виконає запит за товаром та запропонує підтвердити чи треба додати товар до системи. Також на другому кроці система пропонує користувачу додати параметри моніторингу, який він бажає. Система дає можливість обрати тип зміни ціни: підвищення або зниження, та величину у відсотках, на яку повинна змінитися ціна товару. Під час моніторингу, якщо правило відстеження буде виконано, система відправить повідомлення до користувача за допомогою електронного листа.

**Висновки.** У даній роботі було проведено огляд та аналіз сучасних методів організації веб-застосунків. Також було досліджено тематичну область електронної торгівлі і проведено порівняльний аналіз. Було зроблено припущення про доцільність створення системи, що могла б швидко та зручно проводити моніторинг та нотифікування користувача.

Як результат, була змодельована система, що дає можливість користувачу передати мінімум інформації про продукт та водночас отримувати детальну інформацію про моніторинг вартості обраної продукції.

#### Список літератури

1. Düüna K. *Secure your Node.js web application*. The Pragmatic Programmers, LLC, 2016. 222 p.
2. OWASP Top 10. *Application Security Risk*. URL: [https://www.owasp.org/index.php/Top\\_10-2017\\_Top\\_10](https://www.owasp.org/index.php/Top_10-2017_Top_10) (дата звернення 25.03.2018).
3. Fowler M. *Serverless architectures* URL: <https://martinfowler.com/articles/serverless.html> (дата звернення 05.04.2018).
4. Пritула І., Агапов Д. *OWASP Top 10: практический взгляд на безопасность веб приложений*. URL: <https://habrahabr.ru/company/simplepay/blog/28499> (дата звернення 25.05.2018).
5. Kimhi T. *The state of the serverless ecosystem*. URL: <https://medium.com/@talkimhi/the-state-of-the-serverless-ecosystem> (дата звернення 25.05.2018).
6. Jamieson F. *Losing the server? Everybody is talking about serverless architecture*. URL: <https://bcs.org/content/conWebDoc/58491> (дата звернення 13.04.2018).
7. *AWS documentation*. URL: <https://aws.amazon.com/documentation/> (дата звернення 03.02.2018).
8. Miller Ron. *Amazon launches lambda, an event-driven compute service*. URL: [https://techcrunch.com/2014/11/13/amazon-launches-](https://techcrunch.com/2014/11/13/amazon-launches-lambda-an-event-driven-compute-service/)

- lambda-an-event-driven-compute-service/ (дата звернення 17.03.2018).
9. Miller Ron. *AWS Lambda makes serverless applications a reality* URL: <https://techcrunch.com/2015/11/24/aws-lambda-makes-serverless-applications-a-reality/> (дата звернення 07.05.2018).
10. Haviv Yaron. *CNCF Serverless whitepaper*. URL: <https://github.com/cncf/wg-serverless/tree/master/whitepaper/> (дата звернення 07.05.2018).
11. Sbarski P. *Serverless architectures on AWS*. Manning Publications Co, 2017. 500 p.
12. *Redux, API docs*. URL: <https://redux.js.org> (дата звернення 11.05.2018).
13. *Claudia.JS, API docs*. URL: <https://claudiajs.com/> (дата звернення 06.04.2018).

#### References (transliterated)

1. Düüna K. *Secure your Node.js web application*. The Pragmatic Programmers, LLC, 2016. 222 p.
2. OWASP Top 10. *Application Security Risk*. Available at: [https://www.owasp.org/index.php/Top\\_10-2017\\_Top\\_10](https://www.owasp.org/index.php/Top_10-2017_Top_10) (accessed 25.03.2018).
3. Fowler M. *Serverless architectures* Available at: <https://martinfowler.com/articles/serverless.html> (accessed 05.04.2018).
4. Pritula I., Agapov D. *OWASP Top 10: prakticheskiy vzglyad na besopasnost' web prilozheniy* [OWASP Top 10: a practical look at the security of web applications]. Available at: <https://habrahabr.ru/company/simplepay/blog/28499> (accessed 25.05.2018).
5. Kimhi T. *The state of the serverless ecosystem*. Available at: <https://medium.com/@talkimhi/the-state-of-the-serverless-ecosystem> (accessed 25.05.2018).
6. Jamieson F. *Losing the server? Everybody is talking about serverless architecture*. Available at: <https://bcs.org/content/conWebDoc/58491> (accessed 13.04.2018).
7. *AWS documentation*. Available at: <https://aws.amazon.com/documentation/> (accessed 03.02.2018).
8. Miller Ron. *Amazon launches lambda, an event-driven compute service*. Available at: <https://techcrunch.com/2014/11/13/amazon-launches-lambda-an-event-driven-compute-service/> (accessed 17.03.2018).
9. Miller Ron. *AWS Lambda makes serverless applications a reality* Available at: <https://techcrunch.com/2015/11/24/aws-lambda-makes-serverless-applications-a-reality/> (accessed 07.05.2018).
10. Haviv Yaron. *CNCF Serverless whitepaper*. Available at: <https://github.com/cncf/wg-serverless/tree/master/whitepaper/> (accessed 07.05.2018).
11. Sbarski P. *Serverless architectures on AWS*. Manning Publications Co, 2017. 500 p.
12. *Redux, API docs*. Available at: <https://redux.js.org> (accessed 11.05.2018).
13. *Claudia.JS, API docs*. Available at: <https://claudiajs.com/> (accessed 06.04.2018).

Надійшла (received) 01.06.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Сидоренко Ганна Юрївна (Сидоренко Анна Юрьевна, Sydorenko Ganna Yuriivna)** – 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](mailto:annsydorenko01@gmail.com)

**Малько Максим Миколайович (Малько Максим Николаевич, Malko Maksym Mykolayovych)** – 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/0000-0002-0125-2141>; e-mail: [maxim\\_malko@hotmail.com](mailto:maxim_malko@hotmail.com)

**Ляшенко Микита Андрійович (Ляшенко Никита Андреевич, Lyashenko Mykyta Andriyovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1825-0088>; e-mail: [neiket@hotmail.com](mailto:neiket@hotmail.com)

*V. L. LYSYTSKYI, Y. Y. MORHUN***DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR EFFECTIVE ENTERPRISE PRODUCT POLICY CREATION**

The problem of developing a software tool for an effective enterprise product policy creation is considered. Existing methods for an enterprise product policy creation require the execution of a large number of computational operations, and those operations can be processed faster and more accurate by using of personal computers. The object of this research is IT-enterprise which is developing web-applications for automatization of relationships between enterprises and clients. The main point of the work is developing of program tool that uses algorithmic model of information technology for enterprise product policy creation to increase enterprise profitability. During the work, the current state of the problem of enterprise product policy creation, as well as existing software tools that could be used to create the enterprise product policy, were considered. A review of existing software development methodologies was performed. The task about developing of algorithmic model, software tool architecture and program system for enterprise product policy creation was set. The software tool that is developed contains of several functional modules. There are listed algorithms that describe how those modules work. The algorithmic model uses hierarchy analysis method for creation of assortment of product policy and simplex method for solving task of linear programming for calculation of production volumes for chosen products. The functional and non-functional requirements were developed for program, the three-layer software architecture of the web-application was chosen, program code was written, and program system was tested. The graphical user interface was developed and described. The graphical user interface provides users with ability to enter information, which is required for enterprise product policy creation, and retrieve results which are set of products, that enterprise should produce, and volumes of production of those products. The conclusion about results of developing program system and the possibility to use the algorithmic model in future researches were made. The results of the work can be used for development of information technology of enterprise product policy creation.

**Keywords:** product policy, enterprise, information technology, algorithmic model, hierarchy, optimization, effectivity.

*V. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, Я. Ю. МОРГУН***РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТОВАРНОЇ ПОЛІТИКИ ПІДПРИЄМСТВА**

Розглядається проблема розробки програмного засобу для формування ефективної товарної політики підприємства. Існуючі методи формування товарної політики вимагають виконання великої кількості обчислювальних операцій, а використання електронно обчислювальних машин може збільшити швидкість і точність виконання таких операцій. Об'єктом дослідження є IT-підприємство, що здійснює розробку веб-додатків для автоматизації взаємодії між підприємствами та клієнтами. Метою даної роботи є розробка програмного засобу, який використовує алгоритмічну модель інформаційної технології формування товарної політики підприємства, для підвищення прибутковості підприємства. Під час виконання роботи, було розглянуто сучасний стан проблеми формування товарної політики підприємства, а також існуючі програмні засоби, що можуть бути використані для формування товарної політики підприємства. Було виконано огляд існуючих методів розробки програмних засобів. Поставлена задача розробити алгоритмічну модель, архітектуру програмної системи і програмну систему для формування товарної політики підприємства. Розроблений програмний засіб містить декілька функціональних модулів, алгоритми функціонування кожного модулю описані в цій статті. Алгоритмічна модель використовує метод аналізу ієрархії для формування товарного асортименту та симплекс-метод вирішення задачі лінійного програмування – для визначення об'ємів виробництва товарів. Для програмної системи були розроблені функціональні та нефункціональні вимоги, було обрано тришарову архітектуру веб-застосунку, написано програмний код і виконано тестування програмної системи. Розроблено графічний інтерфейс користувача, який надає можливість вводити інформацію, необхідну для формування товарної політики, та отримувати результати – товари, які необхідні виробляти, і об'єми виробництва таких товарів. Зроблено висновки про результати розробки програмного засобу і можливість використання алгоритмічної моделі в майбутніх дослідженнях. Результати роботи можуть бути використані як теоретичні основи для розробки інформаційної технології формування товарної політики підприємства.

**Ключові слова:** товарна політика, підприємство, інформаційна технологія, алгоритмічна модель, ієрархія, оптимізація, ефективність.

*V. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, Я. Ю. МОРГУН***РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТОВАРНОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

Рассматривается проблема разработки программного средства для формирования эффективной товарной политики предприятия. Существующие методы формирования товарной политики требуют выполнения большого количества вычислительных операций, а использование электронно-вычислительных машин может увеличить скорость и точность выполнения таких операций. Объектом исследования является IT-предприятие, которое занимается разработкой веб-приложений для автоматизации взаимодействия между предприятиями и клиентами. Целью данной работы является разработка программного средства, которое использует алгоритмическую модель информационной технологии формирования товарной политики предприятия, для повышения прибыльности предприятия. В ходе выполнения работы, были рассмотрены современное состояние проблемы формирования товарной политики предприятия, а также существующие программные средства, которые могут быть использованными для формирования товарной политики предприятия. Были рассмотрены существующие методы разработки программных средств. Поставлена задача разработать алгоритмическую модель, архитектуру программной системы и программную систему для формирования товарной политики предприятия. Разработанное программное средство содержит несколько функциональных модулей, алгоритмы функционирования каждого из модулей описаны в статье. Алгоритмическая модель использует метод анализа иерархий для формирования товарного ассортимента и симплекс-метод решения задачи линейного программирования – для определения объемов производства товаров. Для программной системы были разработаны функциональные и нефункциональные требования, была выбрана трехслойная архитектура веб-приложения, написан программный код и выполнено тестирование программной системы. Разработан графический интерфейс пользователя, который дает возможность вводить информацию, необходимую для формирования товарной политики, и получать результаты – товары, которые необходимо производить, и объемы производства таких товаров. Сделаны выводы о результатах разработки программного средства и возможность использования алгоритмической модели в будущих исследованиях. Результаты работы могут быть использованы как теоретический основы для разработки информационной технологии формирования товарной политики предприятия.

**Ключевые слова:** товарная политика, предприятие, информационная технология, алгоритмическая модель, иерархия, оптимизация, эффективность.

**Introduction.** Nowadays enterprise, that acts within the market economy, requires achievement and supporting high level of enterprise competitiveness and customers demand on made products or services. Modern market is dynamic, so that all changes should be analyzed by enterprise management as soon as possible to develop fast response in order to increase their profit. Current subject oriented technologies of enterprise product policy (PP) developing use methods with a lot of calculation operations to find optimal decision [1].

The usage of computer systems could process big information amounts in a few seconds and store data, that are required for further processing. Existing software tools (ST) made good toolkit for enterprise product assortment creation. They provide a person who creates PP with an ability to execute all required calculations to create effective enterprise product assortment by using experience and toolkit. Therefore, actual task is developing of ST that should provide ability (by using modern effective methods and models) to create in interactive mode optimal enterprise PP dependent on limitation, ensure maximum profit in planned time measures.

**Formulation of the problem.** The object of research is IT-enterprise which is developing web-applications (web-sites, forums, online-shops) for automatization processes of customer relationships. The enterprise has qualified experts, information resources, equipment and materials that provide ability to develop web-applications based on modern information technologies. The enterprise has limited resources.

The current situation within the market of intellectual product is characterized by favorable conditions. The mid-term effective PP can be created because of raised demand for web-applications. Therefore, the task about developing ST for effective enterprise PP creation is raised. For solving this task, it is necessary to do next steps:

- 1 To develop algorithmic model (AM) of information technology (IT) for creation enterprise product policy based on qualitative and quantitative methods;
- 2 To design architecture of program system (PS) that will implement the AM of IT;
- 3 To develop program tools and their interfaces that are parts of PS.

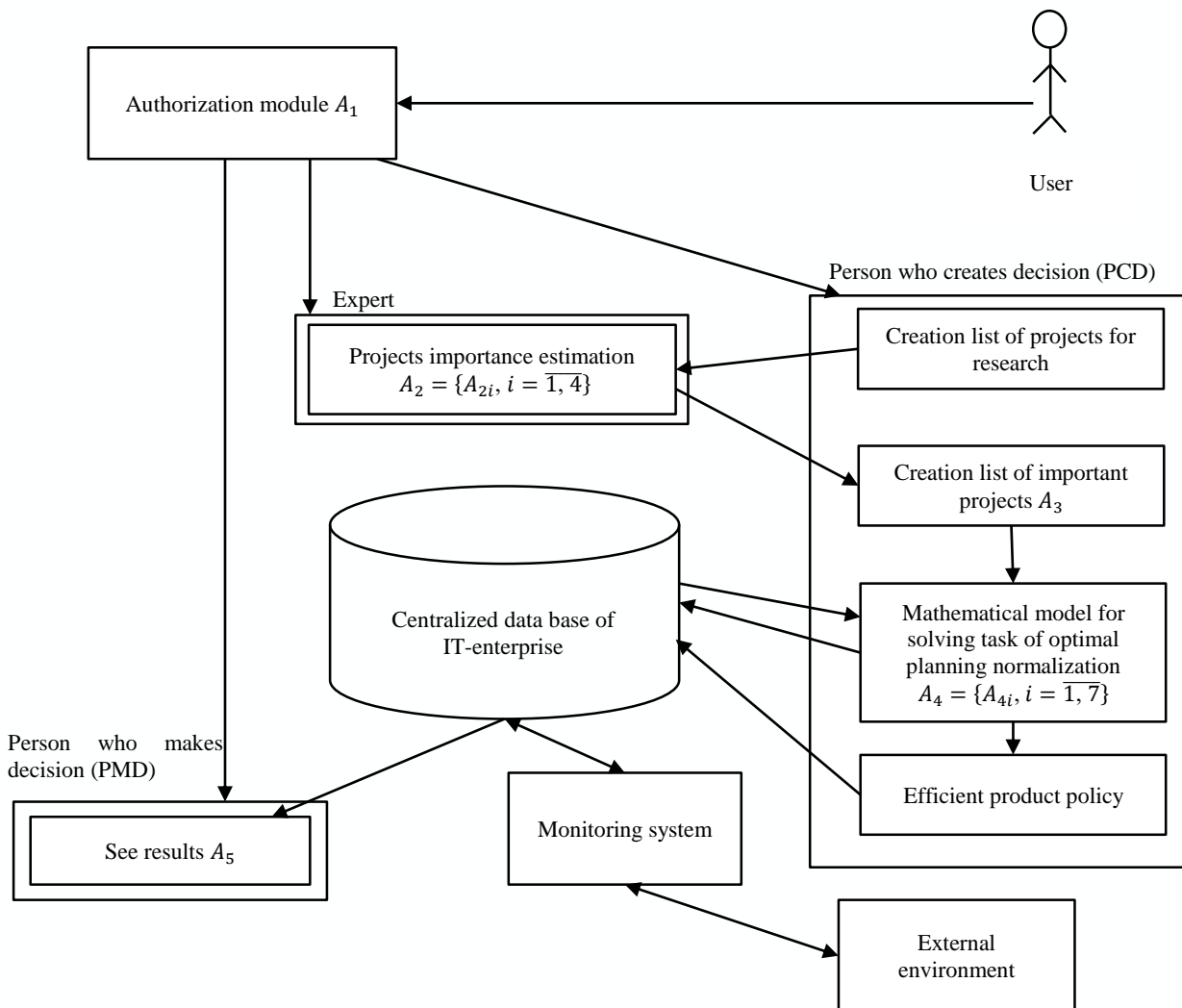


Fig. 1. Schema of interaction of parts of AM of IT for creation enterprise PP

**Modules of program system.** PS of IT for creation enterprise PP is a complex of interacting programmatical structural elements that build defined structure for active creation effective enterprise PP to support related technical tools. Architecture of PS is a basic organization describing its main structural elements their interrelationships and relationships with PS environment. The architecture developing process requires making several decisions about PS organization, selection ST that will be included to PS, their interfaces and behavior. The baseline of architecture development process is algorithmic model (AM) of IT for creation enterprise PP. Fig. 1 demonstrates structural features of algorithmic model  $AM = \{A; R \subset A \times A\}$ , where  $A = \{A_i\}$  – set of interacted algorithms  $A_i$ ,  $R \subset A \times A$  – connections between the algorithms.

The set of algorithms is listed below:

- $A_1$  – user authorization algorithm;
- $A_2$  – algorithm of hierarchy analysis method:
- $A_{21}$  – hierarchy creation algorithm;
- $A_{22}$  – defining of local priorities of hierarchy elements;
- $A_{23}$  – algorithm of creation of matrices for paired comparisons;
- $A_{24}$  – algorithm of products global priorities definition;
- $A_3$  – algorithm of creation important projects list;
- $A_4$  – algorithm of normalization of mathematical model for solving task of optimal planning:
- $A_{41}$  – data input (matrix of conditions  $A$ , vector of limits  $b$ , vector of coefficients of linear form  $c$ );
- $A_{42}$  – validate input;
- $A_{43}$  – input data correction;
- $A_{44}$  – search of initial reference plan by the method of synthetic basis (II algorithm);
- $A_{45}$  – solving of linear programming (LP) task by the simplex method (II algorithm);
- $A_{46}$  – authenticate solution;
- $A_{47}$  – investigate area of stability of solution of LP task;
- $A_5$  – algorithm of results presentation.

Connections between described algorithms are in Fig. 2.

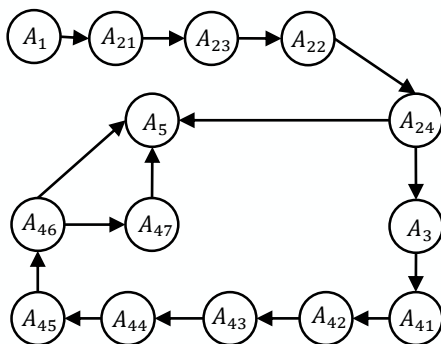


Fig. 2. Connections between algorithms  $A_i \in A$

It is reasonable to develop PS as a web-oriented application, which implements the AM. That type of

application allows usage of “thin” client architecture. The “thin” client architecture has three main modules: server of database, application server, client application. The database (DB), that support PS functionality, should be in DB server. The application server processes all information (hierarchy creation, mathematical calculations of project priorities, creation of list of the best projects, LP task solving, results presentation. Client performs only data input and calls available functions on the application server [2].

The JDBC (Java DataBase Connectivity) driver was used for configuration of connection between DB server and application server. It provides ability to configure and retrieve connection to database, build SQL-queries programmatically, manage transactions and configure handling of results of SQL-queries execution by using Java objects [3].

Presentation of user interface use HTML pages. Those pages are managed by application server and sent to client with response. The user interface includes such active elements like buttons and hyperlinks. HTML form generates and sends HTTP request to application server by clicking the active element. The application server processes each HTTP request and returns a response. This is how interaction between client and application server is implemented [4].

The PS is implemented based on popular MVC (Model-View-Controller) pattern. MVC pattern provides 3 parts of the PS:

- 1 Model – this PS component is intended to work with DB.
- 2 View component represents user’s interface.
- 3 Controller.

The model component declares Java objects to represent all tables from DB. Also, in scope of the model component DB connection was configured and some classes were implemented. Those classes support creation and running custom SQL scripts and processing results of running SQL scripts [5].

View component is responsible for showing all program control elements to end-user. The main purpose of view component is data representing which are stored in application DB. One of advantages of MVC pattern is modular architecture, so that PS can support several view components simultaneously and each component can implement different method of representation of the same data. View component should build HTML pages to show them on the user’s computer. JSP (Java Server Pages) technology was used to build HTML pages dynamically in runtime [6].

Controller component implements main business logic of data processing. Controller can process input data from user and stored data from DB. This component is responsible for handling input HTTP requests from user’s computer (view component).

MVC is used to decouple data that are in DB from representation of data on user’s computer. The main goal of taking this decision – flexible implementation of algorithmic model that can make it easier to do some changes in the future. Developed architecture is based on modular structure of PS [2].

**Block of calculations.** PP requires defining the assortment and volume of products to produce by IT enterprise. That's why PP includes qualitative and quantitative parts. The qualitative part of PP is an assortment of products to produce. This assortment contains a set of different products that enterprise can produce. The quantitative part describes production volume of each product from PP [1].

Considering such separation of PP, it's reasonable to use different methods for defining assortment of PP and for calculation production volume of chosen products.

Dependency of product policy assortment from the criterion declared by enterprise management can be presented by hierarchies. First or lower level of hierarchy contains different kinds of goods, that enterprise has been producing or wants to produce in the future. Last or top hierarchy level should describe the main goal of enterprise activity. There are should be several criteria for estimation of influence of some products to global goal achievement. Those criteria should be placed on intermediate hierarchy levels. Therefore, a hierarchy should contain at least three levels.

This hierarchy can be used in process of creation and managing of enterprise PP assortment. The example of possible hierarchy is in Fig. 3 [7].

Analytic hierarchy process (AHP) – is a mathematical tool of the system approach for hard decision-making tasks. This method describes sequence of algorithms which are used for calculation of priority of elements which are on the first level of the hierarchy (they are elements of IT-enterprise PP assortment) relatively to main goal from last level of the hierarchy. Fig. 2 presents the sequence of execution of algorithms  $A_{2j}, j = \overline{1, 4}$  to solve AHP task for IT-enterprise PP creation [8].

The process of defining a product range of future PP requires the creation of sorted set of products. That set should be ordered by global priority values decreasing. The first part of products, which have sum of global priorities equals to 0.8 will be included to compromise solution of multicriteria task. That measure value is configurable and can be changed depending on task [7].

The process of PP creation requires defining not only product assortment but production volumes of selected products to get maximum profit by sale that products [9].

In order to calculate production volumes of selected products the task of linear programming was set. This task provides the opportunity to specify global target of optimization and limits for existed resources. One of existed method for solving that type of task is simplex method that provides sequence of solutions and search for optimal solution [10].

Fig. 2 shows sequence of executing algorithms  $A_{4j}, j = \overline{1, 7}$  for solving task (1) for planning production volumes for the products.

$$L = (\mathbf{c}, \mathbf{x}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0},$$

where  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$  – is a vector of production volumes of  $i$ -th product from PP assortment;

$\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$  – is a vector of limits, that are related to production technology, delivery, and sale of products;

$\mathbf{A} = (\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n)$  – is a matrix  $m \times n$  ( $n \geq m$ ) of condition of production technology;

$\mathbf{a}_1 = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})^T$  – is a vector of condition of production technology;

$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_n)$  – is a vector of prices, that are used while selling one item of  $i$ -th product.

**User interface.** National bank of standardized science-technical definitions defines “user interface” (UI) as a complex of hardware and software to support interaction between end-user and computer [11].

Graphical UI was developed for ST for creation of IT-enterprise PP. That decision is based on high popularity of that user interface type. Also, graphical UI is easy to learn from end-user point of view.

Interface for ST was implemented based on HTML-pages which show main elements to control program like menu, buttons, hyperlinks, and data retrieved from the server. Also, HTML-pages provide ability to configure graphical style of user interface [12].

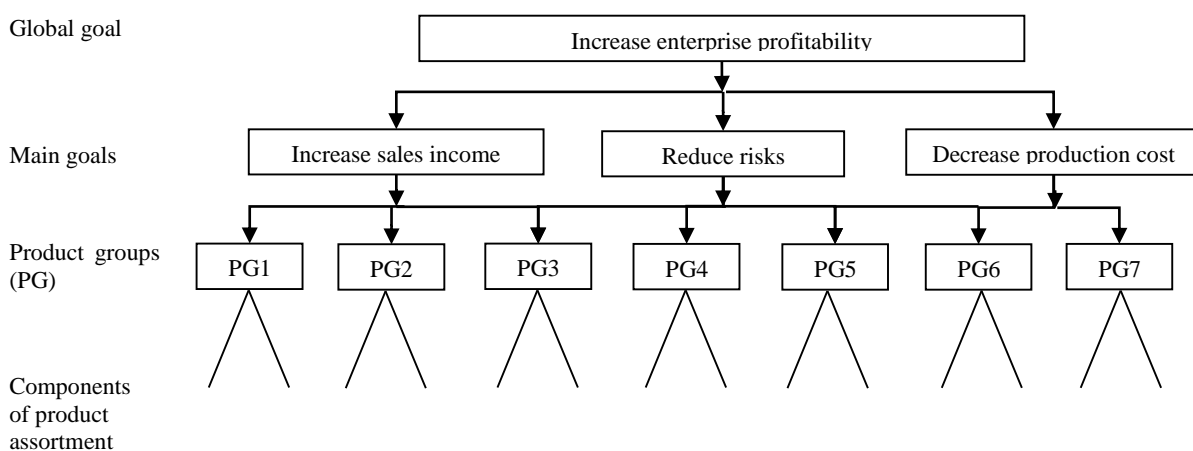


Fig. 3. Hierarchy model of impact of products to enterprise profitability

Each authorized user has rights to perform certain operations within developed ST. PS defines 3 user roles: “PMD” – a person who makes a decision, “PCD” – a person who creates a decision, “Expert” – a person who participates in process of pair comparisons. All user’s eligible actions depend on his role and they are shown in ST main menu (Fig. 4).

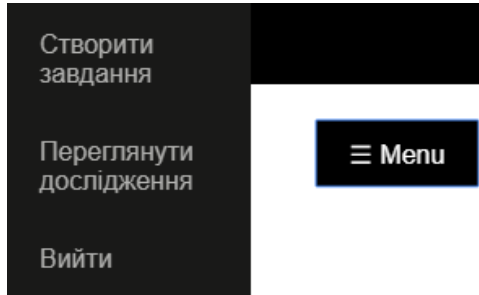


Fig. 4. Menu for user with role “PMD”

The Process of organization of data input is an important part of developing graphical UI. HTML language declares many standard input elements (i.e. text field, text area, numeric field, date field, dropdown list). These elements were used for implementation of graphical UI for ST for creation of IT-enterprise PP. Fig. 5 shows sample of form for task (1) normalization. Sample of form for hierarchy creation is in Fig. 6 [12].

Another important part of graphical UI developing is organization of results presentation. It requires thinking on available types of presenting information to user. There are several types of data presentation: presentation on window form, saving results to some file, report generation. Developed ST presents information on window forms [12].

Previously listed elements of graphical UI describe

main control elements, methods of data input and presenting results.

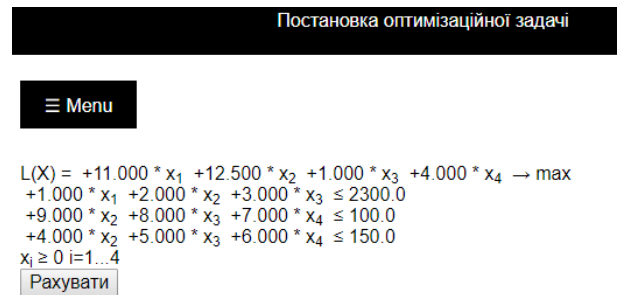


Fig. 5. The form for LP task normalization

**Conclusions.** As the result of scientific research, the following results were obtained:

- 1 The algorithmic model of information technology for enterprise PP creation was developed;
- 2 The architecture of program system that implements algorithmic model of information technology for enterprise PP creation was developed;
- 3 Software tools were developed to use in process of creation enterprise PP.

These results can be considered as theoretical basis for developing science-based information technology for enterprise product policy creation.

**References:**

1. *Маркетинг в сферах діяльності: Учеб. посobie* / Под ред. д-ра екон.наук, проф. Н. А. Нагапетьянца. Москва: Вузовский учебник, 2007, 272 с.
2. *Модель-вид-контролер*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Модель-вид-контролер> (дата звернення: 10.03.2018).

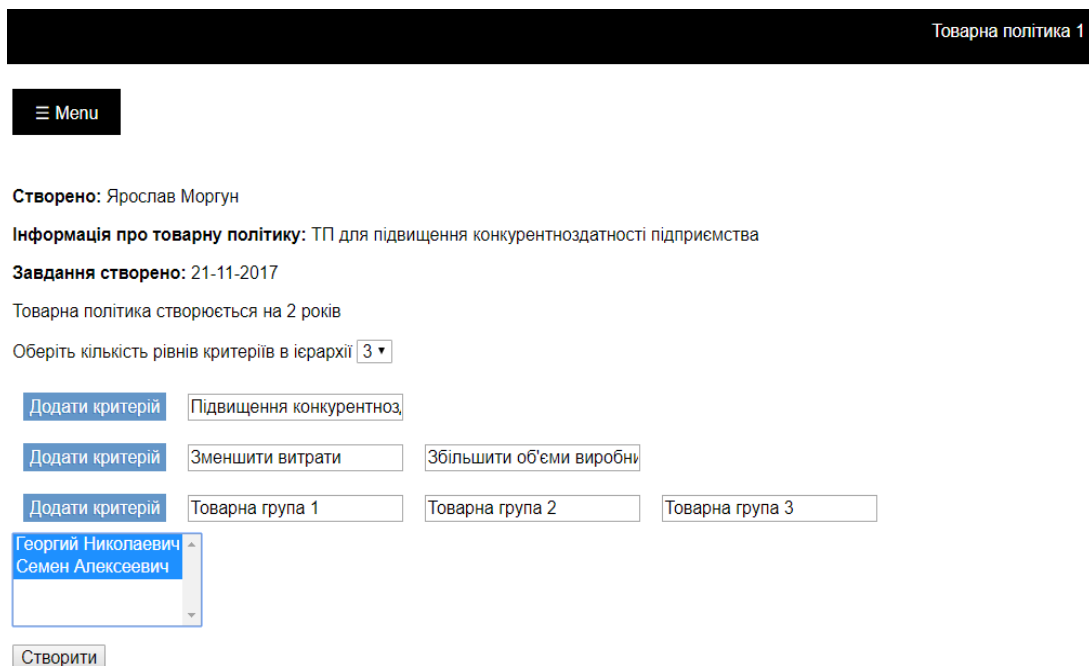


Fig. 6. The form for creation of hierarchy for PP research

3. *Технології Java SE – Бази даних.* URL: <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/jdbc> (дата звернення: 09.03.2018).
4. Berners-Lee T., Connolly D. *Hypertext Markup Language (HTML) / A Representation of Textual Information and MetaInformation for Retrieval and Interchange.* URL: <https://www.w3.org/MarkUp/draft-ietf-iiir-html-01.txt> (дата звернення: 10.03.2018).
5. Amuthan G. *Spring MVC Beginner's guide.* Birmingham, Packt Publ., 2014, 347 p.
6. *JavaServer Pages.* URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/JavaServer\\_Pages](https://en.wikipedia.org/wiki/JavaServer_Pages) (дата звернення: 10.03.2018).
7. Саати Т. Л. *Принятие решений. Метод анализа иерархий.* Москва: Радио и связь, 2007, 278 с.
8. *Метод анализа иерархий.* URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_анализа\\_иерархий](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_анализа_иерархий) (дата звернення: 23.01.2018).
9. Зотов В. В. *Ассортиментная политика фирмы.* Москва: Эксмо, 2006, 240 с.
10. Лисицький В. Л. *Автоматизація операційних досліджень на базі персональних ЕОМ: навчальний посібник.* Харків: ХДПУ, 1997, 93 с.
11. *Класифікація інтерфейсів.* URL: [http://ua-referat.com/Класифікація\\_інтерфейсів](http://ua-referat.com/Класифікація_інтерфейсів) (Дата звернення 15.03.2018).
12. Norman D. *The design of everyday things.* New York, Basic Books Publ., 2013, 368 p.
2. *Model-view-controller.* Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Model-view-controller> (accessed 10.03.2018).
3. *Java SE Technologies – Database.* Available at: <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/jdbc> (accessed 09.03.2018).
4. Berners-Lee T., Connolly D. *Hypertext Markup Language (HTML) / A Representation of Textual Information and MetaInformation for Retrieval and Interchange.* Available at: <https://www.w3.org/MarkUp/draft-ietf-iiir-html-01.txt> (accessed 10.03.2018).
5. Amuthan G. *Spring MVC Beginner's guide.* Birmingham, Packt Publ., 2014, 347 p.
6. *JavaServer Pages.* Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/JavaServer\\_Pages](https://en.wikipedia.org/wiki/JavaServer_Pages) (accessed 10.03.2018).
7. Saati T. L. *Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij.* [The decision making process: The hierarchy analysis method]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 2007, 278 p.
8. *Analytic hierarchy process.* Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic\\_hierarchy\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_hierarchy_process) (accessed 23.01.2018).
9. Zotov V. V. *Assortimentnaja politika firmy.* [Assortment policy for enterprise]. Moscow: Eksmo Publ, 2006, 240 p.
10. Lysyc'kyj V. L. *Avtomatyzacija operacijnyh doslidzen' na bazi personal'nyh EOM: navchal'nyj posibnyk.* [Operation investigation automatization based on PC]. Kharkiv, KhDPU Publ., 1997. - 93 p.
11. *Klasyfikatsiia interfeisiv* [Classification of interfaces]. Available at: [http://ua-referat.com/Класифікація\\_інтерфейсів](http://ua-referat.com/Класифікація_інтерфейсів) (accessed 15.03.2018).
12. Norman D. *The design of everyday things.* New York, Basic Books Publ., 2013, 368 p.

**References (transliterated):**

Received 12.05.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Лисицький Василь Лаврентійович (Лисицький Василий Лаврентьевич, Lysytskyi Vasylii Lavrentiiovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри; Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6073-0844>; e-mail: [naukaint2016@gmail.com](mailto:naukaint2016@gmail.com)

**Моргун Ярослав Юрійович (Моргун Ярослав Юрьевич, Morhun Yaroslav Yuriiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7399-4937>; e-mail: [yarki95@gmail.com](mailto:yarki95@gmail.com)



***V. V. MOSKALENKO, S. I. KACHANOVA***

### **АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ В РАМКАХ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАЗВИТИЮ ПРЕДПРИЯТИЯ**

Проведен обзор современных методов формирования инвестиционного портфеля, рассмотрены подходы к разработке систем поддержки принятия инвестиционных решений. На основе этого сделаны выводы о том, что такие системы предназначены для информационного и аналитического обеспечения процесса формирования инвестиционного портфеля или проектов других предприятий, или ценных бумаг, которые выпускают различные компании. При формировании таких портфелей не учитывается влияние инвестиций предприятия в объекты на стратегическое развитие этого предприятия. Предлагается подход к формированию инвестиционного портфеля предприятия, которое занимается внешним и внутренним инвестированием. В качестве инвестиционных ценностей, в которые вкладываются собственные средства предприятия, рассматриваются проекты развития предприятия (внутреннее инвестирование), проекты и ценные бумаги других предприятий (внешнее инвестирование). Выбор объектов инвестирования осуществляется на основе функции полезности. Функция полезности строится на основе критериев максимизации доходности инвестиций, минимизации инвестиционного риска и максимизации степени влияния инвестиционного объекта на стратегическое развитие. Предложен бизнес-процесс формирования инвестиционной программы, который состоит из следующих основных процедур: распределение инвестиционных ресурсов между портфелями инвестиций; формирование портфеля инвестиционных проектов, которые будут реализовываться в рамках программы развития предприятия; формирование портфеля внешних инвестиций в проекты других предприятий; формирование портфеля ценных бумаг; формирование общего портфеля инвестиций предприятия как объединение трех портфелей. Этот бизнес-процесс реализуется в рамках алгоритмического модуля системы поддержки принятия решений по развитию предприятия. В результате использования такого модуля формируется портфель инвестиций предприятия. Эта система поддержки принятия решения является частью систем управления эффективностью предприятия класса Enterprise Performance Management, эти системы предназначены для информационно-аналитической поддержки процессов стратегического управления предприятия.

**Ключевые слова:** инвестиционный портфель, внутренние инвестиции, внешние инвестиции, функция полезности, бизнес-процесс, система поддержки принятия решения, система управления эффективностью предприятия.

***V. V. MOSKALENKO, S. I. KACHANOVA***

### **АЛГОРИТМІЧНИ МОДУЛЬ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРОГРАМИ В РАМКАХ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З РОЗВИТКУ КОМПАНІЇ**

Проведено огляд сучасних методів формування інвестиційного портфеля, розглянуті підходи до розробки систем підтримки прийняття інвестиційних рішень. На основі цього зроблено висновки про те, що такі системи призначені для інформаційного та аналітичного забезпечення процесу формування інвестиційного портфеля або проектів інших підприємств, або цінних паперів, які випускають різні компанії. При формуванні таких портфелів не враховується вплив інвестицій підприємства в об'єкти на стратегічний розвиток цього підприємства. Пропонується підхід щодо формування інвестиційного портфеля підприємства, яке займається зовнішнім й внутрішнім інвестуванням. В якості інвестиційних цінностей, в які вкладаються власні кошти підприємства, розглядаються проекти розвитку підприємства (внутрішнє інвестування), проекти та цінні папери інших підприємств (зовнішнє інвестування). Вибір об'єктів інвестування здійснюється на основі функції корисності. Функція корисності будується на основі критеріїв максимізації прибутковості інвестицій, мінімізації інвестиційного ризику та максимізації ступеня впливу інвестиційного об'єкту на стратегічний розвиток. Запропоновано бізнес-процес формування інвестиційної програми, який складається з таких основних процедур: розподіл інвестиційних ресурсів між портфелями інвестицій; формування портфеля інвестиційних проектів, які будуть реалізовуватися в рамках програми розвитку підприємства; формування портфеля зовнішніх інвестицій в проекти інших підприємств; формування портфеля цінних паперів; формування загального портфеля інвестицій підприємства як об'єднання трьох портфелів. Цей бізнес-процес реалізується в рамках алгоритмічного модуля системи підтримки прийняття рішень з розвитку підприємства. В результаті використання такого модуля формується портфель інвестицій підприємства. Ця система підтримки прийняття рішення є частиною систем управління ефективністю підприємства класу Enterprise Performance Management, ці системи призначені для інформаційно-аналітичної підтримки процесів стратегічного управління підприємства.

**Ключові слова:** інвестиційний портфель, внутрішні інвестиції, зовнішні інвестиції, функція корисності, бізнес-процес, система підтримки прийняття рішення, система управління ефективністю підприємства.

***V. V. MOSKALENKO, S. I. KACHANOVA***

### **ALGORITHMIC MODULE FOR INVESTMENT PROGRAM FORMATION WITHIN THE DECISION SUPPORT SYSTEM OF THE COMPANY DEVELOPMENT**

The article reviews modern methods of investment portfolio formation and approaches to the development of investment decision support systems. Therefrom it is concluded that such systems are intended for information and analytical support of the process of forming of portfolios of investment in other companies' projects or in securities issued by different entities. Formation of such portfolios does not take into account the impact of a company's investment on this company strategic development. The article offers the approach of forming an investment portfolio at the company engaged both in external and internal investment. The company development projects (internal investment) and other companies' securities (external investment) are considered to be investment values for investing the company's own funds. The choice of investment objects is carried out based on the utility function. The utility function is based on the criteria of maximization of the investment yield and the degree of impact of an investment object on strategic development, and minimization of the investment risk. The article offers the business process of the investment program formation, which contains the following main procedures: investment resources distribution between investment portfolios; forming a portfolio of investment projects that will be implemented within the company development program; formation of a portfolio of foreign investments in projects of other enterprises; formation of a portfolio of securities; formation of a common company investment portfolio as the aggregate of the three above. This business process is realized within the scope of the algorithmic module of the decision support system for the company development. The use of such a module is followed by formation of the company investment portfolio. This decision support system is a part of the Enterprise Performance Management Systems, which are designed to provide information and analytical support to processes of the company strategic management.

**Keywords:** investment portfolio, internal investment, external investment, utility function, business process, decision support system, enterprise performance management system.

**Введение.** В условиях динамично изменяющейся экономической среды для предприятия важным является с одной стороны быть конкурентоспособным, а с другой – обеспечивать себе стабильное и устойчивое развитие предприятия. Инвестиционная деятельность для предприятия важна не только с точки зрения увеличения доходов, но и для реализации программы развития. На основе существующих методов формирование портфеля инвестиций осуществляется на основе критериев максимизации инвестиционного дохода и минимизации рисков. В предлагаемых методах нет рассмотрения перспектив развития предприятия, благодаря инвестициям в различные инвестиционные ценности. Поэтому предлагается рассматривать формирование портфеля инвестиций предприятия с точки зрения развития предприятия. Так как инвестиционные решения требуют обработки большого количества информации, то применяются широко на практике программные продукты, реализующие системы поддержки принятия инвестиционных решений. В работе рассмотрим идею построения алгоритмического модуля такой системы.

**Анализ проблемы.** Все задачи инвестиционного характера решаются в рамках системы управления инвестиционной деятельностью. Такие системы строятся как системы поддержки принятия инвестиционных решений. На рынке программных продуктов предлагаются различные системы, которые информационно и аналитически поддерживают процессы управления инвестициями предприятий. Однако в современных условиях с появлением новых механизмов и источников инвестирования деятельности предприятий, возникает и необходимость применения новых информационных технологий и пересмотра структуры таких систем. В современных СППР используются не только передовые информационные технологии в области сбора, хранения и анализа данных об инвестиционных объектах, но и новые модели, методы для решения инвестиционных задач, например, оценки инвестиций, формирования портфеля инвестиций и др. Это связано с тем, что изменяются объекты инвестирования, природа факторов, влияющие на инвестиционную привлекательность этих объектов и т.п.

Существуют множество моделей формирования портфеля инвестиций, в основе которых положена классическая теория инвестирования. Портфель инвестиций формируется на основе показателей эффективности (рентабельности инвестиций) и риска. Есть некоторые модификации этих моделей. Например, формирование диверсифицированного портфеля в работе [1] предлагается выполнить с использованием индикатора комбинированной диверсификации (Composite Diversification Indicator), который представляет собой взвешенную сумму, где первое слагаемое – это соотношения диверсификации (Diversification Ratio), как средство учета взаимосвязи между фактическим стандартным отклонением портфеля и средневзвешенной величиной отдельных стандартных отклонений для каждого из активов портфеля. А второе – дисперсия риска (Risk Dispersion – RD) для измерения степени равномерного распре-

ления риска по активам. Используется коэффициент Джини показывающий степень неравенства различных вариантов распределения доходов, разработанный итальянским экономистом К.Джини. Предложенный алгоритм минимальной корреляции (MCA) позволяет взвешивать активы, имеющие самую низкую среднюю корреляцию со всеми другими активами. В [2] предлагается для формирования портфеля на основе модифицированной модели Марковица учитывать не только ожидаемые доходы и риск, но и меру социальной ответственности в процессе принятия инвестиционных решений. Инвестиции распределяются в пространстве «доход/риск/социальная ответственность». Эта модель рассмотрена как модель импульса (Generalized Momentum): абсолютный импульс, импульс волатильности и импульс корреляции, традиционный импульсный коэффициент на основе относительной доходности активов. Она реализуется в рамках алгоритма гибкого распределения активов (Flexible Asset Allocation). В работе [3] были предложены две модели, используемые для оценки реальных параметров: биномиальная модель и модель Блэка-Шоулза, они используются для вычисления стоимости реальных инвестиционных проектов. Идея заключается в том, чтобы даже для выгодного проекта получить дополнительную их ценность за счёт продления периода реализации его, устраняя неопределённость. В современных СППР используются помимо новых информационных технологий и новые модели, методы для решения инвестиционных задач, например, оценки инвестиций, формирования портфеля инвестиций и др. Например, в работе [4] предложена СППР, основу которой составляет модели однокритериальной и многокритериальной оптимизации с возможностью для инвестора выбирать разные критерии доходности и риска для выбора проектов. Методы математического программирования также широко применяются для формирования портфеля ценных бумаг [5, 6]. В [7] используется многокритериальная технология принятия решений. В результате система позволяет пользователю сформировать рейтинг критериев для выбора ценных бумаг, а затем оценивать их и принимать решения об инвестировании. Такой подход целесообразен только для принятия решений о покупке отдельных ценных бумаг, будет затруднительно с помощью этой системы сформировать инвестиционный портфель на длительный период. Во многих научных источниках большое внимание уделяется анализу информации об объекте инвестирования. В [8] предлагается трёхслойную структуру СППР, состоящая из Analysis, Synthesis и Investment Decision Support. На первом уровне определяется многомерная динамика рынка инвестиций. На втором уровне многомерная динамика синтезируется для отражения реальных и потенциальных ситуаций на рынке. На третьем уровне осуществляется поддержка принятия инвестиционных решений на основе традиционных методов решения инвестиционных задач. На основе анализа структур и аналитически-алгоритмической поддержки процессов принятия инвестиционных решения, можно сделать следующие выводы: 1) предлагаемые системы предна-

значены в основном для анализа и принятия решения по одному виду объекта инвестирования – или ценные бумаги, или инвестиционные проекты; 2) во многих работах чаще всего рассматривается объект инвестирования на основе индикаторов доходности и риска; 3) не анализируется вложение инвестиций в проекты или ценные бумаги с точки зрения перспектив развития предприятия–инвестора, что делает затруднительным использование таких систем для принятия долгосрочных решений, для формирования программы развития предприятия.

**Постановка проблемы.** Многие методы для формирования инвестиционных портфелей направлены на получение максимальной доходности при минимальном риске. Однако такой подход может отвлекать денежные ресурсы от инвестиционных объектов, в которые необходимо инвестировать средства, что позволит предприятию развиваться эффективно на стратегическом периоде. Таким образом необходимо сформировать такой портфель, который сочетал бы в себе внешние инвестиционные проекты и ценные бумаги (это обеспечит дополнительную прибыль для предприятия), а также проекты, которые реализуют программу развития предприятия. Следовательно, в состав портфеля должны быть включены объекты в сфере внешнего и внутреннего инвестирования. Внутреннее инвестирование представляет собой вложение средств предприятия на собственное развитие, например, на модернизацию и расширение производственных мощностей, на внедрение новых технологий и т. д. Под внешним инвестированием подразумевается вложение средств предприятия в ценные бумаги и проекты, которые реализуются другими организациями, компаниями и т. д. Целью внешнего инвестирования может быть не только получение инвестиционной прибыли, но и, например, слияние предприятий в рамках стратегии борьбы с конкурентами, стратегии горизонтальной или вертикальной интеграции смежных предприятий и т.п. Таким образом, необходимо сформировать портфель инвестиционных проектов развития предприятия, а также портфель реальных и финансовых инвестиций в рамках внешней инвестиционной деятельности, при этом сочетать противоречивость объектов инвестирования по показателям доходности, риска и перспективности развития. Предлагается для этого использовать функцию полезности.

Модель формирования портфеля инвестиций.

Сформируем функцию полезности, которая должна учитывать критерии максимизации доходности, минимизации риска и максимизации степени влияния инвестиционного объекта на стратегическое развитие. Рассмотрим три обобщённых показателя доходности, риска инвестиций и степени влияния на развитие:  $Y(Z^I)$ ,  $R(Z^I)$ ,  $C(Z^I)$ , где  $Z^I = \{Z_j^I\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  – вектор характеристик инвестиций, который включает такие показатели, как: начальные инвестиции, денежные потоки от осуществления инвестиций, ставка дисконтирования, количество лет реализации инвестиций и др.,  $J$  – количество рассматриваемых инвестиционных объектов одного вида (проекты раз-

вития, внешние проекты и ценные бумаги). Следует отметить, что для каждого вида инвестиционного объекта будут по разному определяться значения  $Y(Z^I)$ ,  $R(Z^I)$ ,  $C(Z^I)$ . Коэффициенты приоритетности критериев выбора инвестиционного объекта удовлетворяют условиям:

$$\sum_{i=1}^3 \rho_i = 1, \quad \rho_1, \rho_2, \rho_3 \geq 0,$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – весовой коэффициент значимости критериев соответственно максимизации доходности инвестиций; минимизации риска инвестиций и максимизации степени влияния инвестиционного объекта на стратегическое развитие.

Тогда функция полезности имеет вид:

$$\Omega^I = \rho_1 \cdot Y(Z^I) + \rho_2 \cdot R(Z^I) + \rho_3 \cdot C(Z^I).$$

Считается, что во время кризиса минимизируется риск, это значит, что весовой коэффициент значимости этого критерия приближается к единице. В свою очередь, при интенсивном росте экономики чаще всего проводится агрессивная инвестиционная политика, это значит, что весовой коэффициент значимости первого критерия должен приближаться к единице. Следовательно, модель формирования портфеля будут содержать критерий оптимизации функции полезности и ограничения на инвестиционные ресурсы. В простейшем случае ее можно представить, как задачу булевого программирования:

$$\Omega^I(X) \xrightarrow{\{x_j\}} \max,$$

$$\sum_{j=1}^J V_j^{\text{inv}} \cdot x_j \cdot W^{\text{inv}}, \quad x_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad X = \{x_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, J.$$

Реализуя эту модель для каждого вида инвестиционного объекта с разными значениями  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  будет сформировано три портфеля: проектов развития, проектов других предприятий и ценных бумаг.

**Бизнес-процесс формирования портфеля инвестиций.** Будем считать, что в инвестиционную программу включаются все проекты, которые касаются деятельности предприятия в сфере внешнего и внутреннего инвестирования.

Тогда бизнес-процесс формирования инвестиционного портфеля предлагается представить в виде следующих основных процедур (рис. 1).

A1. Распределение инвестиционных ресурсов между видами портфелей инвестиций. Для этого используется алгоритм, реализующий механизм пропорционального распределения однородного ресурса. В качестве критерия распределения предлагается использовать функцию полезности.

A2. Формирование портфеля инвестиционных проектов, которые будут реализовываться на предприятии в рамках программы его развития. В работе [7] представлен общий процесс формирования этой программы. Этот процесс построен на концепции

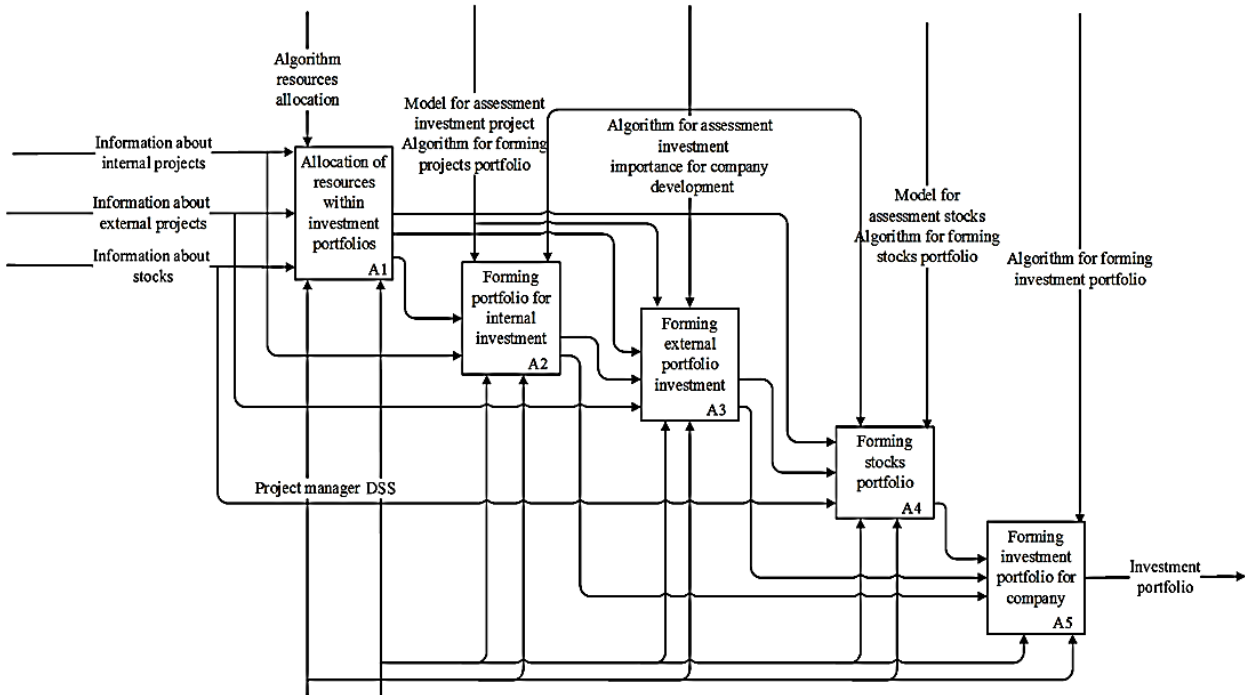


Рис. 1. Бизнес-процесс формирования инвестиционного портфеля предприятия

стратегического выравнивания [10, 11]. На основе декомпозиции стратегических целей и каскадирования ключевых показателей деятельности формируются планы подразделений по годам стратегического периода. Также определяются значения ключевых показателей, которые характеризуют инвестиционную деятельность предприятия.

A3. Формирование портфеля внешних инвестиций предполагает предварительный анализ инвестиционных проектов, которые будут реализованы другими компаниями. На основе этого формируется портфель проектов, выполняется формирование портфелей по годам стратегического периода.

A4. Формирование портфеля ценных бумаг. В ходе реализации этой процедуры осуществляется предварительный отбор только тех ценных бумаг, которые будут важны для предприятия с точки зрения перспектив ее развития. Затем используются модели формирования финансового портфеля, которые используют критерии максимизации доходности инвестиций и минимизации их рисков.

A5. Формирование общего портфеля инвестиций предприятия как объединение трех портфелей. Анализируется общая доходность портфеля, риски и значимость будущих инвестиций для развития. Так как в ходе формирования программы развития были определены ключевые показатели инвестиционной деятельности, то они и будут являться основой для принятия решения об утверждении или пересмотре портфеля инвестиций [7]. Поэтому после анализа сформированных портфелей, необходимо будет пересмотреть важность критериев выбора инвестиционных объектов (ценные бумаги и проекты). Далее

данный процесс реализовывается ещё раз, начиная с процедуры A 1.

Таким образом, в результате итерационного процесса будет сформирован портфель инвестиций, который реализуется предприятием в рамках инвестиционной деятельности на стратегическом периоде. Этот бизнес-процесс является основой алгоритмического модуля системы поддержки принятия решений по развитию предприятия. В результате использования такого модуля формируется портфель инвестиций предприятия. Система поддержки принятия решения является частью систем управления эффективностью предприятия класса Enterprise Performance Management (EPM). Эти системы предназначены для информационно-аналитической поддержки процессов стратегического управления [12].

**Выводы.** Проведен обзор современных методов формирования инвестиционного портфеля, рассмотрены подходы к разработке систем поддержки принятия инвестиционных решений. Предложен подход к формированию инвестиционного портфеля предприятия, которое занимается внешним и внутренним инвестированием. Выбор объектов инвестирования осуществляется на основе функции полезности. Предложен бизнес-процесс формирования инвестиционной программы. Он реализуется в рамках алгоритмического модуля системы поддержки принятия решений по развитию предприятия, которая является одной из компонент EPM-системы.

#### Список литературы

1. Varadi D., Kapler M., Bee H., Rittenhouse C. The Minimum Correlation Algorithm. *Practical Diversification Tool, working paper, Flexible Plan Investments*. 2012. 91 p. URL:

- <https://cssanalytics.wordpress.com/2012/09/21/minimum-correlation-algorithm-paper-release/> (дата обращения 10.06.2018).
- Keller W. J., Putten H. S. V. Generalized Momentum and Flexible Asset Allocation (FAA): An Heuristic Approach. *SSRN Electronic Journal*. 2012. 19 p. URL: <http://alpharotation.com/wp-content/uploads/2015/09/Generalized-Momentum-and-Flexible-Asset-Allocation-FAA.pdf> (дата обращения 10.06.2018).
  - Dinică M. C. The Real Options Attached to an Investment Project. *Economia. Seria Management*. 2011. V. 14. № 2. 8 p. URL: <http://mer.ase.ro/files/2011-2/23.pdf> (дата обращения 11.06.2018)
  - Caballero H. C., Schmidt E. K. Decision support system for portfolio components selection and prioritizing. *Paper presented at PMI® Global Congress 2014 – North America, Project Management Institute*. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/decision-support-system-portfolio-components-selection-9386> (дата обращения 10.06.2018).
  - Mansoury M., Mansoury B., Golpayegani S. A. H. Enhanced decision support system for portfolio management using financial indicators. *International Journal of Business Information Systems Strategies*. 2012. Vol. 1. P. 1–9.
  - Mahajan K. S., Kulkarni R. V. Stock Market Prediction and Investment Portfolio Selection Using Computational Approach. *Journal of Computer Engineering*. 2015. Vol. 17, issue 3. Ver. VII. P. 53–62.
  - Songsangyos P. The Decision Support System for Hierarchical Portfolio Management. *International Journal of Information and Education Technology*. 2014. Vol. 4. No. 4. URL: <http://www.ijiet.org/papers/423-T0007.pdf> (дата обращения 12.06.2018).
  - Chen W., Cao L., Qin Z. An Investment Decision Support System (IDSS) for Identifying Positive, Neutral and Negative Investment Opportunity Ranges with Risk Control in Stock Markets. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*. 2008. Vol. 4. P. 239–253.
  - Moskalenko V. V., Zakharova T.V., Fonta N.G. Technology of formation of development program as a system of company's annual plans based on key performance indicators. *European cooperation Scientific Approaches and Applied Technologies*. 2015. Vol. 2(2). P. 108–124.
  - Wang H. L., Ghose A. On the foundations of strategic alignment. *The Proceedings of the 2006 Australia and New Zealand Academy of Management Conference*. Dunedin, New Zealand, December 2006. URL: [https://www.anzam.org/wp-content/uploads/pdf-manager/2285\\_WANG\\_GHOSE-ANZAM2006.PDF](https://www.anzam.org/wp-content/uploads/pdf-manager/2285_WANG_GHOSE-ANZAM2006.PDF) (дата обращения 12.06.2018).
  - Walter J., Kellermanns F. W., Floyd S. W. Strategic alignment: A missing link in the relationship between strategic consensus and organizational performance. // *Strategic Organization*. 2013. Vol 11, issue 3. P.304–328.
  - Moskalenko V. V., Berezenko Y. S. The concept of an architectural solution for the service of building a strategic enterprise map. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 55 (1276). С. 45–50.
- References (transliterated)**
- Varadi D., Kapler M., Bee H., Rittenhouse C. The Minimum Correlation Algorithm. *Practical Diversification Tool, working paper, Flexible Plan Investments*. 2012. 91 p. Available at: <https://cssanalytics.wordpress.com/2012/09/21/minimum-correlation-algorithm-paper-release/> (accessed 10.06.2018).
  - Keller W. J., Putten H. S. V. Generalized Momentum and Flexible Asset Allocation (FAA): An Heuristic Approach. *SSRN Electronic Journal*. 2012. 19 p. Available at: <http://alpharotation.com/wp-content/uploads/2015/09/Generalized-Momentum-and-Flexible-Asset-Allocation-FAA.pdf> (accessed 10.06.2018).
  - Dinică M. C. The Real Options Attached to an Investment Project. *Economia. Seria Management*. 2011, vol. 14., no. 2, 8 p. Available at: <http://mer.ase.ro/files/2011-2/23.pdf> (accessed 11.06.2018).
  - Caballero H. C., Schmidt E. K. Decision support system for portfolio components selection and prioritizing. *Paper presented at PMI® Global Congress 2014 – North America, Project Management Institute*. Available at: <https://www.pmi.org/learning/library/decision-support-system-portfolio-components-selection-9386> (accessed 10.06.2018).
  - Mansoury M., Mansoury B., Golpayegani S. A. H. Enhanced decision support system for portfolio management using financial indicators. *International Journal of Business Information Systems Strategies*. 2012, vol. 1, pp. 1–9.
  - Mahajan K. S., Kulkarni R. V. Stock Market Prediction and Investment Portfolio Selection Using Computational Approach. *Journal of Computer Engineering*. 2015, vol. 17, issue 3, ver. VII, pp. 53–62.
  - Songsangyos P. The Decision Support System for Hierarchical Portfolio Management. *International Journal of Information and Education Technology*. 2014, vol. 4, no. 4. Available at: <http://www.ijiet.org/papers/423-T0007.pdf> (accessed 12.06.2018).
  - Chen W., Cao L., Qin Z. An Investment Decision Support System (IDSS) for Identifying Positive, Neutral and Negative Investment Opportunity Ranges with Risk Control in Stock Markets. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*. 2008, vol. 4, pp. 239–253.
  - Moskalenko V. V., Zakharova T.V., Fonta N.G. Technology of formation of development program as a system of company's annual plans based on key performance indicators. *European cooperation Scientific Approaches and Applied Technologies*. 2015, vol. 2(2), pp. 108–124.
  - Wang H. L., Ghose A. On the foundations of strategic alignment. *The Proceedings of the 2006 Australia and New Zealand Academy of Management Conference*. Dunedin, New Zealand, December 2006. Available at: [https://www.anzam.org/wp-content/uploads/pdf-manager/2285\\_WANG\\_GHOSE-ANZAM2006.PDF](https://www.anzam.org/wp-content/uploads/pdf-manager/2285_WANG_GHOSE-ANZAM2006.PDF) (accessed 12.06.2018).
  - Walter J., Kellermanns F. W., Floyd S. W. Strategic alignment: A missing link in the relationship between strategic consensus and organizational performance. *Strategic Organization*. 2013, vol 11, issue 3, pp. 304–328.
  - Moskalenko V. V., Berezenko Y. S. The concept of an architectural solution for the service of building a strategic enterprise map. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific papers. Series: System Analysis, Control and Information Technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. № 55 (1276), pp. 45–50.
- Поступила (received) 12.08.2018

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Москаленко Валентина Володимирівна (Moskalenko Valentina Vladimirovna, Moskalenko Valentina Volodymyrovna)** – 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/0000-0002-9994-5404>; e-mail: [valentinamosk17@gmail.com](mailto:valentinamosk17@gmail.com)

**Качанова Світлана Ігорівна (Kachanova Svetlana Igorivna, Kachanova Svitlana Igorivna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; e-mail: [ksvetlana13.96@gmail.com](mailto:ksvetlana13.96@gmail.com)

**A. O. TURETSKYI, B. M. VORONA, M. A. VOVK, S. I. YERSHOVA**

### **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODELS AND SOFTWARE FOR THE RECOMMENDER SYSTEM OF CONSUMER GOODS**

There have been proposed investigation of the problem of creating recommendations with technical description for building the Recommender System of consumer goods with help of modern algorithms, approaches, principles and contains the investigation of the most popular methods. It was defined, that the deployment of Recommender Systems is one of the rapidly developing areas for improving applied information technologies, tools for automatic generating offers service based on the investigation of the personal needs and profile of customers. It was investigated, that such systems have started to play a very important role in the fast growing Internet, as they help users to navigate in a large amount of information, because users are not able to analyze a large amount of information, because it is very difficult and takes a lot of time and effort, but due to such systems, namely Recommender Systems that are able to filter a large amount of information, and provide for users the information and recommendations their likes the problem can be solved and instead of providing the static information, when users search and, perhaps, buy products, Recommender Systems increase the degree of interactivity to expand the opportunities provided to the user. It was defined, that Recommendation systems form recommendations independently for each specific user based on past purchases and searches, and also on the basis of the behavior of other users with help of recommendation services, which collect different information about a person using several methods and at the same time all systems are shared. An overview of content-based, collaborative filtering and hybrid methods was performed. An overview of Alternating Least Squares and Singular Value Decomposition recommendation algorithms was performed. The design of the Recommender System of consumer goods software component was described. The main features of software implementation and programming tools for the system which is being developed were explained. The conclusions about the problems of Recommender Systems and the review of existing algorithms were made.

**Keywords:** recommender system, consumer goods, alternating least squares method, singular value decomposition method, models, software component, recommendations.

### **А. О. ТУРЕЦЬКИЙ, Б. М. ВОРОНА, М. А. ВОВК, С. І. ЄРШОВА РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИБОРУ ТОВАРІВ МАСОВОГО ВЖИТКУ**

Запропоновано дослідження проблеми створення рекомендацій, з технічним описом для побудови рекомендаційної системи для вибору товарів масового вжитку за допомогою сучасних алгоритмів, підходів, принципів і містить дослідження найбільш популярних методів. Було визначено, що впровадження рекомендаційних систем є однією з областей, які швидко розвиваються для вдосконалення прикладних інформаційних технологій, інструментів для автоматичного генерування пропозицій, заснованих на дослідженні особистих потреб і профілю клієнтів. Було досліджено, що такі системи почали грати дуже важливу роль в швидко зростаючому Інтернеті, оскільки вони допомагають користувачам орієнтуватися у великій кількості інформації, користувачі не можуть аналізувати великий обсяг інформації, адже це дуже складно і також вимагає багато часу і зусиль, але завдяки рекомендаційним системам, які можуть фільтрувати великий обсяг інформації і надавати користувачам інформацію і рекомендації, які їм подобаються, проблема може бути вирішена і замість надання статичної інформації, коли користувачі шукають, і можливо, купують продукти, такі системи збільшують ступінь інтерактивності для розширення можливостей, що надаються користувачеві. Було визначено, що рекомендаційні системи формують рекомендації самостійно для кожного конкретного користувача на основі минулих покупок і пошуків, а також на основі поведінки інших користувачів за допомогою служб рекомендацій, які збирають різну інформацію про людину, що використовує кілька методів, і в той же час всі системи є загальними. Було проведено огляд методів фільтрації на основі контенту, спільної фільтрації і гібридних методів. Було виконано огляд алгоритмів альтернативних найменших квадратів і сингулярного розкладання. Описана конструкція рекомендаційної системи програмного забезпечення для вибору товарів масового вжитку. Зроблено пояснення деяких можливостей програмної реалізації і інструментів програмування для розробленої системи. Зроблено висновки про проблеми рекомендаційних систем і огляд існуючих алгоритмів.

**Ключові слова:** рекомендаційна система, товари масового вжитку, метод альтернативних найменших квадратів, метод сингулярного розкладу, моделі, програмний компонент, рекомендації.

### **А. О. ТУРЕЦКИЙ, Б. М. ВОРОНА, М. А. ВОВК, С. И. ЕРШОВА РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ТОВАРОВ МАССОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ**

Предложено исследование проблемы создания рекомендаций, с техническим описанием для построения рекомендательной системы для выбора потребительских товаров с помощью современных алгоритмов, подходов, принципов и содержит исследование наиболее популярных методов. Было определено, что внедрение рекомендательных систем является одной из быстро развивающихся областей для совершенствования прикладных информационных технологий, инструментов для автоматического генерирования предложений, основанных на исследовании личных потребностей и профиля клиентов. Было исследовано, что такие системы начали играть очень важную роль в быстрорастущем Интернете, поскольку они помогают пользователям ориентироваться в большом количестве информации, пользователи не могут анализировать большой объем информации, это требует много времени и усилий, но благодаря рекомендательным системам, которые могут фильтровать большой объем информации и предоставлять пользователям информацию и рекомендации, которые им нравятся, проблема может быть решена и вместо предоставления статической информации, когда пользователи ищут и покупают продукты, такие системы увеличивают степень интерактивности для расширения возможностей, предоставляемых пользователю. Было определено, что рекомендательные системы формируют рекомендации самостоятельно для каждого конкретного пользователя на основе прошлых покупок и поисков, а также на основе поведения других пользователей с помощью служб рекомендаций, которые собирают различную информацию о человеке, использующем несколько методов, и в то же время все системы являются общими. Был проведен обзор методов фильтрации на основе контента, совместной фильтрации и гибридных методов. Был выполнен обзор алгоритмов альтернативных наименьших квадратов и сингулярного разложения. Описана конструкция рекомендательной системы программного обеспечения для выбора товаров массового потребления. Объяснены основные возможности программной реализации и инструменты программирования для разрабатываемой системы. Сделаны выводы о проблемах рекомендательных систем и обзор существующих алгоритмов.

**Ключевые слова:** рекомендательная система, товары массового потребления, метод альтернативных наименьших квадратов, метод сингулярного разложения, модели, программный компонент, рекомендации.

**Introduction.** Nowadays, we live in the age of information – the time of unrestricted access to the information resources, the time at which the amount of information published by various sites and other sources of information. The number of similar objects is so large and that it is difficult for the user to find the information they need among them through a regular review. Users are always care about their free time and want to use it with the benefit. Recommender Systems contribute to this process, as the system selects and provides itself a quantitative and qualitative assessment of the preferences of the user or a particular object.

Recommender Systems are used in the large number of applications. Firstly, Recommender Systems are used in Internet commerce to help users to choose the concrete products. Such services collect information about the benefits of users and try to offer them useful products. The best examples of companies using this approach are Amazon, LinkedIn, eBay, iTunes and others. Another important usage area user chooses books, music and movies. For example, Pandora, GoodReads, IMDb, Netflix and Hulu services use Recommender Systems for these purposes.

Now such systems are used extensively in e-commerce to provide recommendations. The objects of recommendations can be goods in an online store, a set of sections of the website, media content, other users of the web service. In modern conditions of big data, Recommender Systems are an indispensable mechanism for content retrieval. The saving time and the ease of use determine the relevance and necessity of such systems.

The problem of choosing consumer goods on the marketplace.

**The problem of choosing consumer goods on the marketplace.** The competition of products in the modern digital era is becoming more and more rigorous. Customers can easily access to the information about this product over the Internet. In addition, customers can share their opinions on products in the form of ratings or reviews through various web services, such as Amazon. Therefore, instead of relying on traditional TV ads or banners on the Internet, consumers can now view many competing products before they make their final purchasing decision.

Everyone faces the problem of finding and choosing (or choosing and searching, since these are different concepts) both in the world of the Internet and in simple things. Choosing a book, a movie for viewing at night, a household product, and even a modern gadget, without which it is difficult to imagine the life of modern society. And there are so many options, especially when you do not really know what you want, and even if you know, but you cannot try. In the modern world, there are many options and alternatives, from a variety of products from different suppliers in different marketplaces. But every vendor, recommends basically what he needs to sell, but not what the user could appreciate.

In the process of searching the user faces the problem of choice (and vice versa, after the choice of the problem of finding is arisen) a product that will satisfy its needs. Recommender Systems are used to solve this

problem. So, Recommender System (sometimes replacing "system" with a synonym such as platform or engine) is a subclass of information filtering systems that seeks to predict the "rating" or "preference" a user would give to an item.

**Recommender Systems.** Recommender Systems appeared on the Internet a long time ago, about 20 years ago. Recommender Systems – the class of information and search systems that allow to predict which objects will be interesting and useful to the users (provide recommendations to users), based on specific information about the user's profile. Nowadays, there are several (main) approaches of creating recommendations, which used in Recommender Systems:

- content-based filtering;
- collaborative filtering;
- hybrid approaches.

Content-based filtering constructs recommendations on the basis of a user's behavior and objects. For example, user profiles may include demographic information or answers on a specific set of questions, and object profiles may include genre names, actor names, artist names, and other attribute information, depending on the type of object.

Collaborative filtering constructs recommendations that's based on a model of prior user behavior. For example, such as purchase or estimation information. In this case, it does not matter what kind of objects were taken, but it can take into account implicit characteristics that would be difficult to include while creating a profile [1]. The model can be constructed solely from a single user's behavior or, more effectively, also from the behavior of other users who have similar features. When it takes other users' behavior into account, collaborative filtering uses group knowledge to form a recommendation based on like users. In essence, the recommendations are based on the automatic collaboration of multiple users and filtered by those who exhibit similar preferences or behaviors.

Hybrid approaches that combine collaborative and content-based filtering are also increasing the efficiency (and complexity) of Recommender Systems. In the process of work (hybrid approach), Recommender Systems collect data about users using a combination of explicit and implicit methods [2].

Examples of explicit data collection:

- to request the user to evaluate the object on a differentiated scale;
- to request a user to rank a group of objects from the best to the worst;
- representation of the two objects with the question of which of them is the best;
- suggestion to create a list of your favorite user objects.

Examples of implicit data collection:

- observing what the user is inspecting in online stores;
- tracking the online user behavior;
- tracking the contents of the user's computer.

Analysis of various sources of information showed that at the moment, shows that that the collaborative filtering methods are divided into three main groups.

The first group calculates the different similarity measures or similarities between the objects under consideration. Pearson correlation and cosine measure of similarity are the most widely used.

The second group of methods is the methods of intelligent data analysis, which involves the various methods of machine learning. The choice of method in this case depends on the domain area, the available statistical material and the power of the computer system. The last group of methods are a hybrid approaches that involves the use of methods, both from the first group and from the second, applying them in various combinations [3].

**Objectives.** Nowadays, the modern recommendation mechanisms are actively used on most popular social and business websites. They bring tremendous benefits to the owners of these sites and their users.

Most large-scale commercial and social websites recommend their users various offers, such as goods or services for further study of people, specifically their desires and needs. Intelligent reference systems (recommendation mechanisms) handle huge volumes of data to identify potential user benefits.

Consequently, web-based Recommender Systems became relevant to the development and active use in the trade of modern Internet technologies, including e-commerce platforms. Their feature, as noted, is to help the user to find the best alternatives in a multitude of web resources. Recommender Systems are primarily beneficial to users, because through such systems, they easily and quickly find the right, specific and useful information without spending much time for searching.

The purpose of this work is to develop a prototype of software for the Recommender System of consumer goods.

**Explanation of the choice of methods for the Recommender System.** Firstly, it is need to choose a recommendation algorithm that is needed to handle implicit user ratings. The data set consists entirely of the interaction between users and consumer goods. It does not contain information about the system users themselves or about products other than their names.

Therefore, we need an algorithm that could be trained without access to the attributes of the user and the product. This type of algorithms is called collaborative filtration algorithms. For example, the assumption that two users have similar tastes, because they are of the same age, or from one city, it is not collaborative filtering. And the decision that two people might like the same product, as they appreciated whether they already bought many identical or similar goods, is a good example.

A dataset for consumer goods can be enormous because it contains tens of millions of ratings. But in reality it is rather meager because it is sparse. Each user scans and estimates a fairly small percentage – from a few million. And some users can view and estimate only one product

An algorithm is needed to provide acceptable results for such users. Also, the algorithm must be able to scale, because it will have to build large models and, at the same time, quickly generate recommendations [4].

They are usually needed in the near future – within a second. We choose an algorithm from the class of so-called latent factors models, since we are developing a system based on implicit estimates of users. Such mechanisms attempt to explain the observed interactions between a large number of users and products due to the relatively small number of underlying reasons behind them.

The most popular in this class are Alternating Least Squares (ALS) and Singular Value Decomposition (SVD) algorithms. To begin, let's look at ALS, then go to SVD [5].

Two of the most popular recommendation algorithms: "SVD" i "ALS" factorize "user-product" matrix  $A$  on two: matrix "user-property"  $U$  and "property-goods"  $M$ .

SVD – "Singular Value Decomposition", method of decomposition of the matrix:

$$A = UDV^T, \quad (1)$$

where  $A$  – decomposition of the matrix;

$U, V$  – orthogonal matrices;

$C$  – orthogonal matrix.

Calculations by method SVD take more time and it's harder to parse them on a computer [6]. It also does not process very well the matrix with the missing values. When the dataset for the reference system is sparse, the missing values are equal to zero, even if the user could potentially give them the highest score.

In contrast to this mechanism, the algorithm ALS (Alternating Least Squares) works much faster, but with less precision [6]. This applies to any factorization method:

$$A \approx XY^T, \quad (2)$$

where  $A$  – factorization method;

$X, Y$  – matrices with low ranks.

One of the advantages of this algorithm is the fact that it has the ability to precisely customize what will be meant by the loss function. (The loss function is a function which minimized in the model fitting process and represents the chosen measure of disagreement between the observed data and the data "predicted" by a fitted function. For example, in most traditional methods for building generic linear models, the loss function (often called the smallest squares) is calculated as the sum of squares of deviations from the fitted line or plane) [7]. It is possible to ignore missed values. Since, it is necessary to handle a rather abundant number of records, it will be necessary to parallelize the calculation. Also very important is the speed of the algorithm. And for this, the ALS method is better.

Designing the Recommender System of consumer goods. A software product which is developed in this



project is a component of a complex large-scale system, data collection and processing, which helps to make profitable purchases of goods on various online resources and an independent software product, to provide high-quality recommendations to the user of the system.

The purpose of this project is to automate the process of processing and analyzing data to provide users with a system of up-to-date, high-quality, and non-trivial recommendations contained in the system database. Data in the system database can be entered by administrators of this system, whether gathered with help of software products from different sources of information, for example such as trading platforms.

For complete operation, the software is developed taking into account the ability to process a large number of requests from users of the product in the context of continuous updating of the data, as well as its reliability and security, openness and convenience for further improvements and parallelism.

This software product is developed as an independent software, but can interact with larger software systems by further developing REST services. The component consists of two parts: the server part and one web portal. The web portal will be used to provide recommendations to the user and to view information about them, and also used for information management. The server part performs the creating of recommendations and is responsible for the system as a whole.

The connection between the web portal and the component being developed on the server is performed through HTTP requests. During the initial request to the server, the component receives information from the database immediately about the existing recommendations, and if the data is successfully received – the information is returned to the client in response to the request. The creating of recommendations occurs with every update of the database to the actual data.

On the Fig. 1 component-deployment diagram is shown.

This software has two modes of operation: the initial

provision of recommendations to the user when the user has not published any reviews and recommendations based on collaborative filtering, provided that the user has published at least one review (fulfilled the grade) of the product.

The user receives topical recommendations, but if he is not satisfied with certain parameters or objects, it is possible to edit the request using filters. In this way, the software product can update its recommendations and provide more relevant information for the user.

To store the finite data in this software was used DBMS PostgreSQL, which based on SQL. Current version is 9.5, there are the following restrictions in PostgreSQL.

Current version is 9.5, there are the following restrictions in PostgreSQL:

- maximum database size – no restrictions;
- maximum table size – 32 TB;
- maximum recording size – 1,6 TB;
- maximum field size – 1 GB;
- maximum records in the table – no restrictions;
- maximum fields in the record – from 250 to 1600, depending on the types of fields;
- maximum of the indices in the table – there are no restrictions.

The strong points of PostgreSQL are:

- high-performance and reliable transaction and replication mechanisms;
- extensibility the system of embedded programming languages;
- inheritance;
- extensibility scalability [8].

**Features of software implementation, the system which is being developed.** At present, the Python programming language is very popular. The Python core syntax is minimal. At the same time, the standard library includes a large amount of useful features. Python supports several programming paradigms, including structural, object-oriented, functional, imperative and

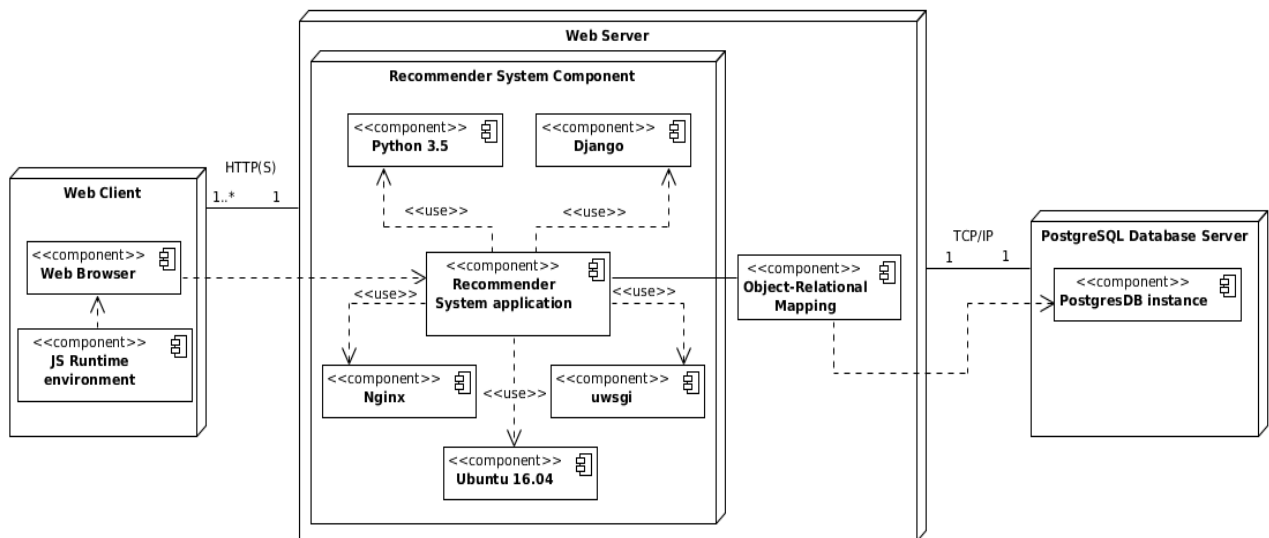


Fig. 1. Component-deployment diagram

aspect-oriented. The main architectural features are dynamic typing, automatic memory management, full introspection, exception handling mechanism, multithreaded computing support, and convenient high-level data structures. The code in Python is organized into functions and classes that can be merged into a module (which in turn can be grouped into packages). Python with packages NumPy, SciPy i MatPlotLib is actively used as a universal environment for scientific calculations as a substitute for common specialized commercial packages. Matlab, IDL and others.

Also, with help of Python, was developed a popular web framework that supports abstraction from low-level databases – Django. Django – this is a high-level web-based framework implemented on the basis of architecture MVC. MVC (Model-View-Controller) – one of the most fundamental architectures for applications, which separates the basic functionality of the application into a number of individual components. This achieves the main goal: one model for many applications. Django has a transparent design, provides for the rapid development of web-based applications, allows the development of dynamic web-sites [8].

In the area of distributed data analysis, the Hadoop framework uses demand, but there are alternatives that offer some important advantages over the typical Hadoop platform. Spark is a scalable data analysis platform that includes primitives for computing in RAM, and therefore has some performance benefits in relation to the Hadoop approach based on a clustered data storage scheme. Spark is implemented on Scala and supports this language Python and Java and provides a unique environment for data processing [9]. Spark is a clustered open source computing platform similar to the Hadoop, but with some useful features that make it an excellent tool for machine learning tasks. Namely, in addition to interactive queries, Spark supports distributed data sets in RAM, optimizing solutions for iterative tasks and reducing access time to data. Spark is implemented in Scala, but freely uses Python as an application development environment. Unlike Hadoop, Spark and Python form a tight integration where Python can easily manipulate distributed data sets as local collective objects [10].

Based on the benefits listed above, the Apache Spark framework and the Python language for creating the recommendations and the framework for implementing the web application for the development of the software system were used [11].

**Review of existing principles (approaches) and problems.** The content-based Recommender Systems try to find a similarity between the goods that people valued earlier, and only products that have a high degree of generality with consumer preferences will be recommended. Modern approaches of obtaining information require creating profiles of customers with tastes, preferences, needs, etc. Information for profiles can be obtained directly from the customer, for example, through questionnaires, or indirectly by analyzing the actions performed by the user.

The limitations of content techniques are related to the objects of recommendations. Therefore, for an

adequate work progress of the system a form is available – for automatic machine analysis, or manual assignment of all parameters.

Another problem is that two different objects, with the same set of properties, are indistinguishable. Although text documents are usually represented by the most representative keywords, content-based systems cannot distinguish a well-written article from poorly written, although they use the same words [12].

Also, the content-based Recommender Systems think too narrowly. The user receives recommendations only for those goods that are similar to goods that have already received his evaluation. To solve this problem, the random technique is used. In some cases, it is necessary to avoid the recommendations of items that are too similar to those already known, for example, another article on the same topic.

As in all Recommender Systems, there is a "cold start" problem. The user needs to evaluate a fairly large number of different products before the system can correctly understand his preferences and give him appropriate recommendations. Therefore, the system will not be able to give exact recommendations to a new customer who has made very few estimates.

An alternative to the content approach can be the collaborative filtering. This is a method of recommendation, in which only the reaction of users to objects is analyzed. The ultimate goal of the method is to as accurately as possible prediction of the estimation that the current user would put to the previously unvalued objects. The more estimates are collected, the more accurate the recommendations are. It turns out that users help each other in filtering objects. Therefore, this method is also called joint filtration.

Methods of collaborative filtering also face problems during operation. The first problem is that new products are regularly added to the Recommender Systems. Such systems in the development of recommendations are guided only by the preferences of users. Therefore, the Recommender System cannot recommend the product until it receives a sufficient number of estimates [12].

In any Recommender System, the number of estimates to be predicted is usually much larger than the number of estimates. It is important that the system is able to effectively predict estimates based on a small number of examples. It is also necessary to have a critical number of users. For example, in advisory systems dealing with movies, a large number of films can only be evaluated by a small number of users, and then these films will be recommended very rarely, even if the estimates of these few users were high. A small number of recommendations can be made to the owners of unusual tastes in comparison with the taste of the majority, for which there are no similar users in the system. Overcoming the problem of sparse estimates can, if searching for similar users use the information about the user, contained in his profile. Most of the recommendations are based on a limited understanding of users and goods, the analysis of which is mainly limited to the information contained in the profiles. Outside the analysis remain information contained in records of user transactions and other available

information. For example, traditional collaborative algorithms do not use information from user and product profiles at all, but they are limited only to information about the assessments made. The profiles themselves are still too primitive [13].

Most of Recommender Systems require a fairly active participation from the user. For example, before issuing a recommendation on a newsgroup, the system needs to obtain estimates of a large number of previously read articles. Since this way of obtaining information is not very user-friendly, methods of indirect evaluation of articles are created. For example, you can analyze the time that a user spent for reading an article, which would indirectly correspond to one or another evaluation. However, indirect estimates often suffer from inaccuracy. Thus, the problem of reducing the obsession of evaluations while maintaining the high quality of recommendations is quite acute for the developers. In particular, it is necessary to understand what the minimum number of evaluations is required from the user, so that this is sufficient for the development of accurate recommendations.

In addition, the current recommendation systems operate in the two-dimensional user-commodity space. This means that they issue recommendations based solely on the information about the user or product and bypass the party contextual information that may be of paramount importance in some applications (and in some special conditions). For example, in many cases, the utility of a product or service may depend on when the consumption occurs (time of year, day of week, time of day). Utility can also depend on who, in what company, under what conditions of the product is consumed.

In such cases, a simple product recommendation to the customer is not enough; when developing the recommendation, the system should refer to additional contextual information about the time and conditions of the intended consumption. In addition to the traditional methods of building a customer profile (such as reliance on keywords and questionnaire demographic information), new techniques have recently emerged, based on automatic word processing, network behavior analysis, etc. These methods allow you to take into account the interests and preferences of users and thereby expand the user profile [13].

In the literature, other approaches of collaborative filtration based on different models were proposed. Other models of collaborative filtering include Bayesian analysis, probabilistic relativistic model, linear regression model, maximum entropy model. Recently a large number of papers have been devoted to the search for more sophisticated probabilistic models of collaborative filtering.

As a results, such problems of Recommender Systems was defined:

- a huge amount of data;
- unfair user's estimations;
- "cold start" – no data about recently added users or objects to the system;
- rarefied ratings;

- difficulty in calculations while the process of working with large databases;
- recommendations of something fundamentally different.

**Conclusions.** In recent years, significant progress has been made in the development of Recommender Systems. Content-based, collaborative filtering and hybrid algorithms for developing recommendations were proposed. Some systems have found practical application in the commercial industry. Nevertheless, despite the progress, for a more efficient work in a large list of applications, the current generation of Recommender Systems requires further improvements. In this paper, various constraints faced by modern recommendatory methods were considered, and a review of necessary improvements was made that should make the work of the recommendation systems more effective. Such improvements include, among others, improved modeling of users and goods, the inclusion of contextual information in the recommender process, the possibility of multi-criteria assessments, the availability of more flexible and less intrusive recommendations.

In this work, the analysis of the subject area and the urgency of the problem of creating a recommendation system for consumer goods was carried out. The task was formulated and methods of creating recommendations were considered: Alternating Least Squares (ALS) and Singular Value Decomposition (SVD) algorithms.

The stage of designing was carried out and the information support of the creation of the Recommender System was developed.

The result of the work is the prototype software of the Recommender System of consumer goods, which can be used to demonstrate the main functions of the system.

#### References

1. George F. Luger *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, 4th Edition. Pearson, 2002. 864 с.
2. Башмаков А. И., Башмаков И. А. *Интеллектуальные информационные технологии: учеб. пособие*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 304 с.
3. Мельник К. В. Применение алгоритма коллаборативной фильтрации для обработки медицинских данных. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 2. С. 193–198.
4. Brown T. A. *Confirmatory factor analysis for applied research*. The Guilford Press, 2006. 493 p.
5. Ройзнер М. *Як працюють рекомендаційні системи*. URL: <https://habrahabr.ru/company/yandex/blog/241455/> (дата звернення: 15.01.2018).
6. *Parallel Matrix Factorization for Recommender Systems*. URL: [http://www.cs.utexas.edu/~inderjit/public\\_papers/kais-pmf.pdf](http://www.cs.utexas.edu/~inderjit/public_papers/kais-pmf.pdf) (дата звернення: 18.01.2018).
7. *Функція витрат*. URL: <http://statistica.ru/glossary/general/funktsiya-poter>. (дата звернення: 07.02.2018).
8. Яковлев С. Ю. *Програмування на Python*. URL: [https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-python\\_part\\_11/index.html/](https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-python_part_11/index.html/) (дата звернення: 17.02.2018).
9. Johns T. Spark. *Альтернатива для швидкого аналізу даних*. URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-spark/> (дата звернення: 21.02.2018).
10. Pentreath N. *Machine Learning with Spark*. Birmingham: Packt Publishing, 2015. 322 p.
11. Королева Д., Філіпов М. *Аналіз алгоритмів навчання рекомендаційних систем*. URL:

- <http://engjournal.ru/articles/816/816.pdf> (дата звернення: 23.01.2018).
12. *Рекомендаційні системи: Частина 1. Введення в підходи і алгоритми.* URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-recommender1/index.html> (дата звернення: 23.01.2018).
  13. Гончаров М. *Data Mining: Рекомендаційні системи.* URL: [http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50\\_132-670.pdf](http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50_132-670.pdf) (дата звернення: 23.01.2018).
  6. *Parallel Matrix Factorization for Recommender Systems.* Available at: [http://www.cs.utexas.edu/~inderjit/public\\_papers/kais-pmf.pdf](http://www.cs.utexas.edu/~inderjit/public_papers/kais-pmf.pdf) (accessed: 18.01.2018).
  7. *Funktsiia vtrata.* Available at: <http://statistica.ru/glossary/general/funktsiya-poter> (accessed: 07.02.2018).
  8. Yakovlev C. *Prohramuvannia na Python Python* [Programming on Python]. Available at: [https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-python\\_part\\_11/index.html/](https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-python_part_11/index.html/) (accessed: 17.02.2018).
  9. Johns T. Spark. *Alternatyva dlia shvydkoho analizu danykh* [An alternative to fast data analysis]. Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-spark/> (accessed: 21.02.2018).
  10. Pentreath N. *Machine Learning with Spark.* Birmingham: Packt Publishing, 2015. 322 p.
  11. Koroleva D., Filipov M. *Analiz alhorytmiv navchannia rekomendatsiinykh system* [Analysis of the training algorithms for reference systems]. Available at: <http://engjournal.ru/articles/816/816.pdf> (accessed: 23.01.2018).
  12. *Rekomendatsiini systemy: Chastyna 1. Vvedennia v pidkhody i alhorytmy* [Advisory Systems: Part 1. Introduction to Approaches and Algorithms]. Available at: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-recommender1/index.html> (accessed: 23.01.2018).
  13. Goncharov M. *Data Mining: Rekomedatsiini systemi* [Advisory Systems]. Available at: [http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50\\_132-670.pdf](http://kek.ksu.ru/EOS/WM/50_132-670.pdf) (accessed: 23.01.2018).

#### References (transliterated)

Received 05.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Турецький Андрій Олегович (Турецький Андрей Олегович, Turetskyi Andrii Olehovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3471-9657>; e-mail: [android.95t@gmail.com](mailto:android.95t@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](mailto:borysvorona@gmail.com)

**Вовк Марина Анатоліївна (Вовк Марина Анатольевна, Vovk Maryna Anatoliivna)** – кандидат економічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4119-5441>; e-mail: [marihavovk@gmail.com](mailto:marihavovk@gmail.com)

**Єршова Світлана Іванівна (Єршова Светлана Ивановна, Yershova Svitlana Ivanivna)** – старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; [svetlana.ershova.2016@gmail.com](mailto:svetlana.ershova.2016@gmail.com)

## ЗМІСТ

<i>Ефимов О. В., Ромашов Ю. В., Чибисов Д. А.</i> Моделирование осесимметричной теплопроводности в компактных изделиях керамического ядерного топлива с учетом температурных зависимостей теплофизических характеристик.....	3
<i>Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V.</i> Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity.....	8
<i>Куценко А. С., Товажнянский В. И.</i> Инвертирование линейных динамических систем в среде квазигармонических сигналов.....	14
<i>Мазманишвили А. С., Решетняк Н. Г.</i> Управление поперечными размерами электронного пучка в соленоидальном поле магнетронной пушки.....	18
<i>Никольченко А. А.</i> Прогнозирование потребительского спроса на сезонные товары с использованием вектора кривой продаж.....	23
<i>Shevchenko S. V., Drupov D. O., Bezmenov M. I.</i> Situational forecasting of electricity demand in the region.....	28
<i>Zinkovskiy O. I., Gamzayev R. O., Bollin A., Tkachuk M. V.</i> A fuzzy-based approach to automated defect identification in distributed software systems and software product lines.....	36
<i>Чалий С. Ф., Богатов Є.О., Прибильнова І. Б.</i> Методи формування упорядкованих по процесам трас журналу подій в задачах процесного управління.....	43
<i>Левикін В. М., Чала О. В.</i> Розробка представлення причинно-наслідкових залежностей для бази знань системи процесного управління.....	48
<i>Сидоренко Г. Ю., Малько М. М., Ляшенко М. А.</i> Використання serverless підходу для створення веб-додатку моніторингу товарів.....	54
<i>Lysytskiy V. L., Morhun Y. Y.</i> Development of software for effective enterprise product policy creation.....	59
<i>Москаленко В. В., Качанова С. И.</i> Алгоритмический модуль формирования инвестиционной программы в рамках системы поддержки принятия решений по развитию предприятия.....	65
<i>Turetskyi A. O., Vorona B. M., Vovk M. A., Yershova S. I.</i> Development and research of models and software for the recommender system of consumer goods.....	70

## CONTENT

<i>Yefimov O. V., Romashov V Yu., Chibisov D. O.</i> Modeling of axisymmetric heat conduction in compact products of ceramic nuclear fuel with the temperature dependencies of thermophysical characteristics.....	3
<i>Nikulina E. N., SeverYn V. P., Kotsiuba N. V.</i> Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity.....	8
<i>Kutsenko O. S., Tovazhnyanski V. I.</i> Inversion of linear dynamical systems under conditions of quasiharmonic signals.....	14
<i>Mazmanishvili O. S., Reshetneak N. G.</i> Controlling the transverse dimensions of the electron beam in the solenoidal field of a magnetron gun.....	18
<i>Nikulchenko A. A.</i> Forecasting of customer demand for seasonal goods using retail curve vector.....	23
<i>Shevchenko S. V., Drupov D. O., Bezmenov M. I.</i> Situational forecasting of electricity demand in the region.....	28
<i>Zinkovskiy O. I., Gamzayev R. O., Bollin A., Tkachuk M. V.</i> A fuzzy-based approach to automated defect identification in distributed software systems and software product lines.....	36
<i>Chalyi S. F., Bogatov E. O., Pribylnova I. B.</i> Techniques of reordering traces in the event logs in business process management tasks.....	43
<i>Levykin V. M., Chala O. V.</i> Development of the representation of cause-effect dependencies for the knowledge base of the business process management system.....	48
<i>Sydorenko G. Y., Malko M. M., Lyashenko M. A.</i> Using the serverless approach for the creating web-application of the monitoring of products.....	54
<i>Lysytskiy V. L., Morhun Y. Y.</i> Development of software for effective enterprise product policy creation.....	59
<i>Moskalenko V. V., Kachanova S. I.</i> Algorithmic module for investment program formation within the decision support system of the company development.....	65
<i>Turetskyi A. O., Vorona B. M., Vovk M. A., Yershova S. I.</i> Development and research of models and software for the recommender system of consumer goods.....	70

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».  
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

*Збірник наукових праць*

*№ 21 (1297) 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 Обухова Г. Б., канд. техн. наук

**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. № 10-18.

Підп. до друку 09.07.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.  
Тираж 100 пр. Зам. № 86. 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

---