



ISSN 2079-0023 (Print)
ISSN 2410-2857 (Online)

ВІСНИК

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

ВЕСТНИК

Национального технического университета «ХПИ».
Серия: Системный анализ, управление
и информационные технологии

BULLETIN

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

№ 2 (4) 2020

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

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

Збірник наукових праць

№ 2 (4) 2020

Видання засноване у 1961 р.

Вестник Национального технического университета
«ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и
информационные технологии

Сборник научных работ

№ 2 (4) 2020

Издание основано в 1961 г.

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

Collection of Scientific papers

No. 2 (4) 2020

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии = 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», 2020. — № 2 (4) 2020. — 76 с. — ISSN 2079-0023.

Видання публікує нові наукові результати в області системного аналізу та управління складними системами, отримані на основі сучасних прикладних математичних методів і прогресивних інформаційних технологій. Публікуються роботи, пов'язані зі штучним інтелектом, аналізом великих даних, сучасними методами високопродуктивних обчислень у системах підтримки прийняття рішень.

Издание публикует новые научные результаты в области системного анализа и управления сложными системами, полученные на основе современных прикладных математических методов и прогрессивных информационных технологий. Публикуются работы, связанные с искусственным интеллектом, анализом больших данных, современными методами высокопродуктивных вычислений в системах поддержки принятия решений.

Для научных работников, преподавателей высшей школы, аспирантов, студентов и специалистов в области системного анализа, управления и компьютерных технологий.

Edition publishes new scientific results in the field of system analysis and control of complex systems, based on the application of modern mathematical methods and advanced information technology. Works related to artificial intelligence, big data analysis and modern methods of high-performance computing in decision support systems are publishing.

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

Свідоцтво Міністерства юстиції України
КВ № 23778-13618Р від 14 лютого 2019 р.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Наказом МОН України № 1643 від 28 грудня 2019 року «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 18 грудня 2019 року» «Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології» внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в базу журналів відкритого доступу DOAJ (Directory of Open Access Journals), Наукометричну базу Index Copernicus (Польща); бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Головний редактор:

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

Заступник головного редактора

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

Члени редколегії:

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

Безменов М. І., 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

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

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

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

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

Ткачук М. В., проф., ХНУ ім. В. Н. Каразіна, Україна

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

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

Відповідальний секретар

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 29 грудня 2020 р.

Editorial

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

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

Editorial staff members:

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

Bezmenov M. I., 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

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

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

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

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

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

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

Tkachuk M. V., prof., V. N. Karazin KhNU, Ukraine

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

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

Executive secretary:

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

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

UDC 519.816

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.01

V. L. LYSYTSKYI, M. O. BOIKO

IDENTIFICATION OF PROBLEM SITUATIONS IN FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF INTELLIGENT BUSINESS SYSTEMS

The paper discusses the issues of increasing the efficiency of production activities of an intelligent business system operating in a dynamic environment by reducing its losses by creating a subject technology for reliable identification of problem situations in the process of functional diagnostics of a business system. The object of the research is an intelligent business system of the IT industry, which produces intelligent products, the results of which depend on the mental abilities of its personnel, who own effective intelligent information technologies. The problem-containing environment was chosen as the basis for analyzing the problem situation, in the depths of which the problem situation arises, develops and manifests itself. A problem-containing environment is characterized by structure and behavior. The behavior of the problem-containing environment is determined by the multidimensionality of the ongoing business processes, their interaction and dynamics. To identify deterministic and non-deterministic problem situations, it is proposed to set them by bipartite graphs and use the technology of inference based on precedents, which has serious advantages over the method of inference based on knowledge. In this work, a cognitive method is used to analyze problem situations of an intelligent business system. The basis of cognitive analysis is formed by the problem-containing environment, in the depths of which the problem situation arises. To study the problem-containing environment, the method of analysis of hierarchies is used, the basis of which is a hierarchy which is a system of levels, each of which consists of elements, factors of the problem-containing environment and an intelligent business system. A complex of models has been developed to construct a bipartite graph of a problem situation and to analyze its problem-containing environment. On the basis of a complex of models, a subject technology for identifying problem situations arising in the process of functional diagnostics of intelligent business systems has been created. The results obtained can be used as a theoretical platform for creating an information technology for functional diagnostics of intelligent business systems operating in a dynamic environment.

Keywords: intellectual business system, functional diagnostics, identification of the problem situation, algorithmic model, hierarchy analysis method, base of precedents

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, М. О. БОЙКО

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОБЛЕМНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ ДІАГНОСТИЦІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ БІЗНЕС СИСТЕМ

У роботі розглядаються питання підвищення ефективності виробничої діяльності інтелектуальної бізнес-системи, що функціонує в умовах динамічного зовнішнього середовища, за рахунок зниження її витрат шляхом створення предметної технології достовірної ідентифікації проблемних ситуацій в процесі функціональної діагностики бізнес-системи. Об'єктом дослідження є інтелектуальна бізнес-система ІТ-індустрії, яка виробляє інтелектуальну продукцію, результати діяльності якої залежать від розумових здібностей її персоналу, що володіє ефективними інтелектуальними інформаційними технологіями. В якості основи для аналізу проблемної ситуації обрано проблемомісне середовище, в надрах якого проблемна ситуація зароджується, розвивається і проявляється. Проблемомісне середовище характеризується структурою і поведінкою. Поведінка проблемомісного середовища визначається багатоаспектністю протікаючих бізнес-процесів, їх взаємодією і динамікою. Для ідентифікації детермінованих і недетермінованих проблемних ситуацій пропонується задавати їх двочастковими графами і використовувати технологію виводу, заснованого на прецедентах, який має серйозні переваги в порівнянні з методом виводу, заснованого на знаннях. У роботі для аналізу проблемних ситуацій інтелектуальної бізнес-системи застосовується когнітивний метод. Основу когнітивного аналізу утворює проблемомісне середовище, в надрах якого зародилася проблемна ситуація. Для дослідження проблемомісного середовища використовується метод аналізу ієрархій, основою якого є ієрархія – система рівнів, кожен з яких складається з елементів, факторів проблемомісного середовища та інтелектуальної бізнес-системи. Розроблено комплекс моделей, необхідних для побудови двочасткового графа проблемної ситуації і аналізу її проблемомісного середовища. На основі комплексу моделей створена предметна технологія ідентифікації проблемних ситуацій, що виникають в процесі функціональної діагностики інтелектуальних бізнес систем. Отримані результати можуть бути використані в якості теоретичної платформи для створення інформаційної технології функціональної діагностики інтелектуальних бізнес-систем, що функціонують в умовах динамічного зовнішнього середовища.

Ключові слова: інтелектуальна бізнес-система, функціональна діагностика, ідентифікація проблемної ситуації, алгоритмічна модель, метод аналізу ієрархій, база прецедентів

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, М. О. БОЙКО

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БИЗНЕС СИСТЕМ

В работе рассматриваются вопросы повышения эффективности производственной деятельности интеллектуальной бизнес-системы, функционирующей в условиях динамичной внешней среды, за счёт снижения её потерь путем создания предметной технологии достоверной

© V. L. Lysytskyi, M. O. Boiko, 2020

идентификации проблемных ситуаций в процессе функциональной диагностики бизнес-системы. Объектом исследования является интеллектуальная бизнес-система IT-индустрии, производящая интеллектуальную продукцию, результаты деятельности которой зависят от умственных способностей её персонала, владеющего эффективными интеллектуальными информационными технологиями. В качестве основы для анализа проблемной ситуации выбрана проблемосодержащая среда, в недрах которой проблемная ситуация зарождается, развивается и проявляется. Проблемосодержащая среда характеризуется структурой и поведением. Структурными элементами её являются элементы функциональных зон, компоненты корпоративной, конкурентной функциональных стратегий, бизнес-процессы рассматриваемой бизнес системы. Поведение проблемосодержащей среды определяется многоаспектностью протекающих бизнес-процессов, их взаимодействием и динамикой. Для идентификации детерминированных и недетерминированных проблемных ситуаций предлагается задавать их двудольными графами и использовать технологию вывода, основанного на прецедентах, который имеет серьезные преимущества в сравнении с методом вывода, основанного на знаниях. В работе для анализа проблемных ситуаций интеллектуальной бизнес системы применяется когнитивный метод. Основу когнитивного анализа образует проблемосодержащая среда, в недрах которой зародилась проблемная ситуация. Для исследования проблемосодержащей среды используется метод анализа иерархий, основой которого является иерархия – система уровней, каждый из которых складывается из элементов, факторов проблемосодержащей среды и интеллектуальной бизнес-системы. Разработан комплекс моделей, необходимых для построения двудольного графа проблемной ситуации и анализа её проблемосодержащей среды. На основе комплекса моделей создана предметная технология идентификации проблемных ситуаций, возникающих в процессе функциональной диагностики интеллектуальных бизнес систем. Полученные результаты могут быть использованы в качестве теоретической платформы для создания информационной технологии функциональной диагностики интеллектуальных бизнес-систем, функционирующих в условиях динамичной внешней среды.

Ключевые слова: интеллектуальная бизнес-система, функциональная диагностика, идентификация проблемной ситуации, алгоритмическая модель, метод анализа иерархий, база прецедентов

Introduction. The intensive formation of the information society is accompanied by the creation of global network technologies, cognitive business systems, the emergence of e-business, cognitive business management, etc. The change in the "material" economy based on physical labor, mechanization, automation, "intellectual" economy, characterized by a significant increase in the role of human and social capital, innovation, information and knowledge, creative labor, creative activity in various fields, represents a global structural shift, which, covering all spheres and branches of the post-industrial economy, changes its scale, dynamics, and internal content. The ongoing shift determines the relevance of revising the old methods of management and organization, the creation of effective methods of strategic management not only of tangible assets, resources, cost, but also the management of intangible assets, intellectual capital. Effective management of strategy implementation presupposes systematic diagnostics of the state of intelligent business systems, one of the components of which is functional diagnostics [1]. In this regard, the purpose of the work is to increase the efficiency of economic activity of an intelligent business system by creating a subject technology for identifying problem situations in functional diagnostics (FD) of intelligent business systems.

Formulation of the problem. The main trends in the development of the world system indicate that the main property of the business system of the future is its constant adaptation to a dynamic external environment. At the same time, the business system should be characterized by great organizational flexibility, inclination to individuals, predominant use of teams, accumulated knowledge, high internal competitiveness, a desire for diversification, etc. [1]–[6].

The strategy of the business system should determine, in a dynamic internal and external environment, a long-term, qualitatively defined direction of development towards a fixed target state. At the same time, the business system remains free of choice, taking into account changes in the external environment. The strategy, ensuring the implementation of the tree of goals of the business system, must contain a corporate, competitive and functional strategy [5, 6]. These strategies implement the structural

elements of a business system (BS) that form its functional zones, which determine the purpose of these zones (marketing, production, personnel, finance, management, foreign economic activity, etc.) [5, 6].

In the course of the functioning of the BS, the structural elements of its functional zones perform separate components of the strategy. This ensures the realization of the goals of the BS goal tree, and, thereby, its movement in a given direction [5]. The description of the BS as a functional system makes it possible to represent it as an integral organism, the effective functioning of which is the main task of the control system of the BS control loop.

FD is intended for reliable assessment of the state of the functional areas of the BS, the state of the processes of implementation of corporate, competitive, functional strategies and their components. In the process of FD, the mechanisms of interaction of functional zones (FZ) and the component of the BS strategy are revealed, when it moves in a given direction, emerging problems are analyzed, influencing factors, the main aspects of the relationship between problems, the implementation of the goal tree, and the results of the BS activity are identified. Thus, the object of FD is the organizational structure of the BS, its FZ, BS strategies and their components. FD of the current state of the BS is directed to the following [1]:

1. Analysis of the degree of achievement of the goals of the BS goals tree at the strategic, tactical, functional levels of strategy implementation management.
2. Early detection of problem situations in the process of strategy implementation.
3. Identification and analysis of the root internal causes that worsen the BS activity.
4. Creation of a scenario of BS actions aimed at updating the functions and structure of the BS, ensuring overcoming the problem situation that has arisen.
5. Introduction into practice at a new qualitative level of the adopted management decisions and control over their implementation.

In the process method of managing the implementation of the strategy, the BS is considered as a complex of interacting business processes (basic, supporting, business processes of management, development), forming a

defining structure designed to actively achieve the target state with a given efficiency [7].

At the stage of formation of the knowledge economy, special attention is paid to human capital, the creation of such a developed infrastructure that would make it possible to use the accumulated experience and knowledge in the field of production and consumption, and would contribute to their further development. Lagging in the process of mastering and creating new knowledge, as a rule, leads to a loss in the competitive struggle [2], therefore, when managing the functioning and development of BS, it is necessary to take into account the most essential features of the knowledge economy. The first of these is the discreteness of knowledge as a product. Specific knowledge is either created or not. The second feature of knowledge is that it is similar in nature to other public goods: once created, they become available, in principle, to everyone, without any discrimination. The information society, by its very nature, ensures an even distribution of knowledge among its members. The third feature of knowledge is that, behind its nature, knowledge is an information product. It does not disappear after consumption, like an ordinary material product. The noted features make significant adjustments to the BS management process. Production base stations are highly dependent on their technical equipment (production capital). This feature significantly affects the methods of managing them. Intelligent BS (IBS) is completely dependent on the mental abilities of personnel with the latest intelligent information technology. It is assumed that IBS creates intelligent products that meet the requirements of efficiency, predictability, reliability, safety [2].

Since the processes of demand, supply, production, consumption, exchange, and distribution of intellectual products are largely determined by humans, the "blind" application of methods for managing production BSs to managing IBS may not be effective. For ischemic heart disease, it is advisable to apply methods of cognitive (knowledge-based) management, taking into account the specific features of the existing technological and human limitations. The basis of cognitive management, as a rule, is the technology of situational management, which provides for making managerial decisions not as planned, but as problem situations (PS) arise, characterized by the presence of a significant gap between the selected and actual directions of development of the BS. PS is called deterministic (routine) if a way to close the gap is known. Deterministic PSs are typical for production BSs. IBS is characterized by non-deterministic PS. In this regard, for the functional diagnosis of ischemic heart disease there is an urgent problem of identification of PS using the positive experience accumulated in the situational management of production BS [8, 9, 10].

Subject technology of identification of PS. When controlling the process of implementing the IBS strategy, it is important not so much the high accuracy of the performance of individual works, but rather finding out how the implemented strategy corresponds to the internal and external conditions of the IBS functioning and to what extent the actual direction of development is able to bring the IBS to the target state. If the detected deviation poses a

significant threat to the achievement of the target state, then they speak of the occurrence of PS. The importance of the PS is estimated by the amount of IBS losses due to the non-detection of the PS, or not eliminating it. All PSs are divided into three following classes [7];

1. Resource PS, due to the disproportion of resources, which determines the "bottlenecks" in the process of implementing the strategy.
2. Structural PS, caused by the inconsistency of the structure of the BS with the structure adequate to the implemented strategy.
3. Informational PS caused by the lack of information and knowledge about PS and ways to overcome it.

The selected classes of PS, complementing each other, form a PS system, which is a complex of interacting PSs that form a certain structure that actively opposes the process of achieving the target state of the BS. The complexity of the analysis of PSs that arise during the implementation of the strategy is conditioned by the variability of processes in time, the lack of quantitative information and knowledge about the dynamics of processes, the complexity of the PS system and their mutual influence. To analyze PS, two methods are used - informational and cognitive (knowledge-based). The informational method is effective in the analysis of deterministic PSs arising under standard conditions. For IBS, problematic situations, as a rule, are not deterministic, informational and the cognitive method is used to analyze them. The basis of cognitive analysis is formed by the problem-containing environment (PCE), in the depths of which PS is generated. PCE is characterized by structure and behavior. The structural elements of the PS are structural elements, functional areas of the IBS, components of corporate, competitive, functional strategies, business processes, incipient, operating, fading PS, etc.

The purpose of the PS analysis is to find, by immersion in the PS, an answer to the complex question: what factors, under the influence of what forces and circumstances, guided by what objects and pursuing what goals, led to the emergence of PS.

The behavior of the PCE is determined by the multidimensional nature of the business processes associated with the PCE, their relationship, dynamics. This causes the emergence of new discrete structures of the PCE, which have a new quality, determine the dynamics of the change in the gap between the selected and actual directions of the IBS movement. To study such PCE, it is advisable to use the method of analysis of hierarchies (MAH). The basis of the MAH is a hierarchy – a system of levels [11], each of which is made up of elements, factors of PCE and IBS. The task in the language of hierarchy is to determine the intensity of the influence of elements of lower levels on the focus of the problem. In the process of implementing the strategy, IBS PS arises as a result of the activity of the structural elements of the FZ participating in the implementation of the strategy components. Therefore, each PS is characterized by a certain interaction between the FZ and the strategy components. If $F = \{f_i\}$ is the set of FZs, $f_i, i = \overline{1, N}$ of the considered IBS and $S_0 \subset S$ is the

set of S_j , $j = \overline{1, M}$ strategy components, then $F_0 \subset F$ is the set of FDs associated with the PCE, and $S_0 \subset S$ is the set of strategy components associated with the PCE. The binary relation $R_0 \subset F_0 \times S_0$ defines the interaction between the selected objects of the PCE generated by the emerging PS. The $\langle f_i, s_j \rangle \in R$ ordered pair indicates that the FZ f_i is involved in the implementation of the s_j IBS strategy component. The bipartite digraph, the set of vertices of which splits into two sets F_0 and S_0 . No vertices from the same set are connected by oriented edges, determines the structure of the PCE. Each ordered pair $\langle f_i, s_j \rangle \in R$ (an edge of a bipartite graph) defines some variable (concept) that sets a joint influence f_i and s_j on the emergence and development of PS, on the change in the gap. This U_{ij} influence can be significant and insignificant and is determined by the $U_{ij} = \alpha_i + \beta_j$ formula, where α_i is the significance of the f_i influence on the focus of the problem, and β_j is the significance of the s_j influence. To determine the α_i and β_j significance, a hierarchical model is considered, where an increase in the gap between the chosen and actual directions of development is considered as the focus of the problem (upper level). The size of the break is determined at time t by the value of the angle $\alpha(t)$ between the selected and actual directions. The cosine of the angle $\alpha(t)$ is determined by the expression

$$\alpha(t) = \mathbf{x}'_b, \mathbf{x}'_\phi(t) / |\mathbf{x}'_b, \mathbf{x}'_\phi(t)|, \quad (1)$$

where

$$\mathbf{x}'_b = (x_b^1, \dots, x_b^j, \dots, x_b^p) \quad (2)$$

is the vector that specifies the chosen direction of development,

$$\mathbf{x}'_\phi(t) = (x_\phi^1(t), \dots, x_\phi^s(t), \dots, x_\phi^p(t)) \quad (3)$$

is the vector that determines the actual direction of development. Violation of inequality $\cos\alpha(t) \geq 1 - \varepsilon$, where ε is the permissible error, indicates the occurrence of PS. The $x^j(t)$, $j = \overline{1, p}$ variable determines the current state of the ischemic heart disease. At the second level of the hierarchy are the systemic characteristics of the functioning and development of IBS, which affect the changes in the gap. This can be income, IBS costs, losses due to risks, etc. At the third level of the hierarchy are $f_i \in F$ FZ. The fourth (lower) level of the hierarchy contains the $s_j \in S$ components of the strategy. As a result of the implementation of the MAI expert procedure, the global priorities α_i^0 of all f_i FZs and the global priorities β_j^0 of all components s_j of the IBS strategy are found. To select a set of essential FZs, they are ranked by decreasing α_i^0 and a set F_0 is formed from the first elements of the resulting series

$$F_0 = \left\{ f_{sj} \in F: \sum_{i=1}^{\rho_0} \alpha_{si} = 0.8 \pm \varepsilon \right\}, \quad (4)$$

where ε is the permissible error, ρ_0 is the cardinality of the F_0 set. To highlight the essential s_j , they are ranked by

decreasing β_j^0 and the S_0 set of the first elements of the resulting series is formed:

$$S_0 = \left\{ s_{lj} \in S: \sum_{j=1}^{g_0} \beta_{lj} = 0.8 \pm \varepsilon \right\}, \quad (5)$$

where g_0 is the cardinality of S_0 . The resulting priorities

$$\alpha_{si}^0, i = \overline{1, \rho_0}, \beta_{lj}^0, j = \overline{1, g_0} \quad (6)$$

normalize and receive the a_{si} significance of the essential FZ and the β_{lj} significance of the essential components of the strategies associated with the PCE of the current PS in the formula (7).

$$\alpha_{si} = \frac{\alpha_{si}^0}{\sum_{i=1}^{\rho_0} \alpha_{si}^0}, \beta_{lj} = \frac{\beta_{lj}^0}{\sum_{j=1}^{g_0} \beta_{lj}^0}. \quad (7)$$

A bipartite digraph, defined on the set of vertices F_0 and S_0 , defines the structure of the PS, serves as a structured description of the current PS. The concepts corresponding to the edges of a bipartite digraph have the following properties:

1. The weight of the $\langle f_{si}, s_{lj} \rangle$ concept is determined by the sum of $\alpha_{si} + \beta_{lj}$ significances
2. $R_0 \subset F_0 \times S_0 \subset F \times S$
3. The f_{si} FZ is involved in the implementation of the s_{lj} component of the IBS strategy.

The $R_0 = S_0 \times \Phi_0$ binary relation characterizes a lot of essential, difficult to formalize relationships that significantly affect the increase in the gap, which determines the mechanism of influence of the PS on the process of implementing the IBS strategy.

When resolving PS, it is proposed to use the precedent-based inference method, which has significant advantages over the knowledge-based inference method. It is especially effective when the following conditions are met:

1. The main source of knowledge about PS is experience, not theory;
2. The managed solution is not unique for a specific software system, but can be used in other cases;
3. The goal is not a guaranteed correct solution, but the best possible [8, 9].

The use case provides a description of a variety of sequences of actions, including the options performed by IBS, to overcome the arisen PS. It includes a description of the PS, the scenario for permitting the PS, the result (validity) of the application of the management decision to resolve the PS. The problem of setting a precedent is the problem of choosing information and knowledge to be included in the description of a precedent, finding a structure that defines the content of a precedent, organizing and identifying a precedent knowledge base (PKB), which ensures efficient search and reusable use. At the same time, one should distinguish procedural knowledge ("dissolved" in algorithms) from knowledge that is separate from algorithms [12]–[14].

The use case knowledge base should contain the following:

1. All known precedents of resolved PS.
2. Adopted management decisions to resolve emerging PS, available recommendations and other experience.
3. The results of the research carried out on the identification, identification, and resolution of PS.

PKB reduces the degree of uncertainty in the formation of management, reduces the risks of making wrong decisions. It is an effective tool for managing knowledge about use cases and how to resolve them by means of the following:

1. New information about similar precedents and experience in resolving their PS.
2. Information on the results of conducted and ongoing research of the precedent, PS, PCE.
3. Information on the results of the resolution of the PS of various precedents.

Since the PCE is constantly updated due to its maintenance, its information can be used to identify PSs that correspond to the same precedent, but do not repeat exactly, which is typical for IBS PS [12].

Setting a precedent should be consistent with the goals and technology of functional diagnostics of IBS. If the precedent with the number e corresponds to q PS forming the $T_e = \{PS_{er}, r = \overline{1, q}\}$ set, then it can be specified by a reference PS_E , reflecting the invariant properties of all $PS \in T_e$ and their PCE. The binary relation

$$R_{0r} \subset F_{0r} \times S_{0r}, F_{0r} \in F, S_{0r} \in S \quad (8)$$

is given for each $PS_r \in T_e$. For the reference PS_E it is necessary to determine

$$R_{0E} \subset F_{0E} \times S_{0E}, F_{0E} \in F, S_{0E} \in S. \quad (9)$$

Let's assume that $R_{0E} = \bigcup_{r=1}^q R_{0r}$. For each $\langle f_i, s_j \rangle \in R_{00}$ concept, it determines the ρ_{ij} value, which is the number of occurrences of the concept in the R_{0r} binary relation. It's obvious that $\rho_{ij} < q$. To determine R_{0E} the $\langle f_i, s_j \rangle$ concepts are ranked in descending ρ_{ij} and the R_{0E} set of the first elements of the resulting series is formed in the formula (10):

$$R_{0E} = \left\{ \langle f_i, s_j \rangle \in R_{00} : \sum_{\langle f_i, s_j \rangle \in R_{0E}} \rho_{ij} = h_e \cdot \rho_0 \pm \varepsilon_0 \right. \\ \left. \rho_0 = \sum_{\langle f_i, s_j \rangle \in R_{00}} \rho_{ij}, 0 \leq h_e \leq 1 \right\}, \quad (10)$$

where ε_0 is the permissible error, and the h_e threshold value for each precedent with the number e is found considering the historical experience of the formation of the T_e class. In particular, if $R_{0r} = R$ for all $r = \overline{1, q}$, then $R_{00} = R_0$ and $h = 1$. Therefore, for deterministic PS the value is close to unity. For non-deterministic PS, the value of h decreases. $h = 0.8$ is taken as an initial approximation. The sets

$$F_{0E} = D_l(R_{0E}), S_{0E} = D_n(R_{0E}) \quad (11)$$

are determined by the left and right regions of the R_{0E} binary relation defining the bipartite graph of the reference

PCE of the precedent with the l number. If the current problem situation of the PS_T is determined by the

$$R_{0T} \subset F_{0T} \times S_{0T}, F_{0T} \in F, S_{0T} \in S \quad (12)$$

binary relation, then to assess its belonging to the class T_e it is necessary in the case when h satisfies the

$$\frac{|R^0|}{|R_{00}|} \geq h_e \pm \varepsilon \quad (13)$$

condition, where ε is the permissible error, $|R^0|$ is the cardinality of the $R_0 = \bigcap_{r=1}^q R_{0r}$ set, $|R_{00}|$ is the cardinality of the set R_{00} check the fulfillment of two conditions:

$$R_0 \subset R_{0T}, \frac{|R^0|}{|R_{00}|} \geq h_e \pm \varepsilon. \quad (14)$$

If the conditions are true, then PS_T belongs to the class T_e . Otherwise, it is referred to a different use case. If PS_T is a deterministic PS belonging to the T_e class, then the managerial decision to overcome the PS_T is determined by the reference PS of the T_e class. If PS_T is a non-deterministic PS belonging to the T_e class, then the management decision on its resolution is determined by one of $PS_r^0 \in T_e$. To find PS_r^0 , the set of

$$Q_e = \{g_j, j = \overline{1, k_e}\} \quad (15)$$

segments g_j of the knowledge base is selected, containing information about the PCE of the precedent with the number e , k_e is the cardinality Q_e .

For each (g_j, PS_r) pair, the probability m_{ir} was obtained expertly that the knowledge segment g_j can be used to reliably describe the PS_r . The degree of similarity between PS_i and PS_s can be estimated by the value

$$\delta_{is} = \frac{|G_s \cap G_i|}{|G_s \cup G_i|}, 0 \leq \delta_{is} \leq 1, \quad (16)$$

where G_s is the set of $q_j \in G_e$ that reliably describe PS_s , G_i is the set that reliably describes PS_i . When $\delta_{is} = 1$ the degree of similarity according to the selected criterion is the greatest.

To reduce the Q_e power, determine the average value m_{jr} , which is equal to \bar{m}

$$\bar{m} = \frac{(\sum_{j=1}^{K_e} \sum_{r=1}^q m_{jr})}{K_e} \cdot q \quad (17)$$

and build a generalized similarity table $PS_r \in T_e$. Matrix columns $PS_r \in T_e$ are defined, rows are $g_j \in G_e$. At the intersection of the j -th row and the r -th column, the \bar{m}_{jr} value is recorded determined by the formula (18):

$$\bar{m}_{jr} = \begin{cases} 1, & \bar{m}_{jr} \geq \bar{m} \\ 0, & \bar{m}_{jr} < \bar{m} \end{cases} \quad (18)$$

Simultaneous similarity of all $PS_r \in T_e$ is estimated by the value

$$\delta = \frac{|\bigcap_{r=1}^q G_r|}{|\bigcup_{r=1}^q G_r|}, \quad 0 \leq \delta \leq 1. \quad (19)$$

The value $\delta = 1$ is achieved when the $G_r = G$, $r = \overline{1, q}$ condition is met. The $G \in Q_e$ set is obtained by successive deletion of the rows of the generalized similarity table containing the largest number of zero elements, until a column of the matrix containing only zero elements appears. The remaining rows of the table without zero columns are determined by the Q_{0e} set of $g_j \in Q_e$ knowledge segments that provide the greatest degree of similarity $PS_r \in T_e$. On the basis of $g_j \in Q_{0e}$ knowledge segments, the vector of x_j^e informative features used for $PS_r \in T_e$ task is formed:

$$x'_e = (x_1^e, \dots, x_j^e, \dots, x_{n_e}^e). \quad (20)$$

To determine PS_r^0 , find the smallest d_{T_r} which is Euclidean distance from the current PS_r problem situation to $PS_r \in T_e$.

The problematic situation m determines the management decision recommended for the resolution of the current PS [15]–[17].

The described process of identifying problem situations defines a subject technology containing a sequence of stages.

Stage 1. Identification during the monitoring of the functioning of the IHD of the arisen PS.

Stage 2. Construction of a bipartite graph defining the current PS and the formation of its two-dimensional image.

Stage 3. Selecting a use case to which the current software belongs.

Stage 4. Identification of the current PS.

Stage 5. Formation of a management decision recommended for the resolution of the current PS.

Conclusions. As a result of the research, a subject technology for identifying problem situations arising in the process of functioning of intelligent business systems has been developed.

The created subject technology can serve as a scientifically grounded platform for the development of information technology for functional diagnostics of intelligent business systems.

References

1. Алексеева М. Б. *Методы и модели диагностики состояния бизнес-системы*. Мурманск: ЧОУ ВО «МОУ», 2016. 84 с.
2. Макаров В. Л., Варшавский А. Е. *Инновационный менеджмент в России: вопросы стратегического управления и научно-технологической безопасности*. Москва: Наука, 2004. 316 с.
3. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовский В. Д. *Интеллектуальные системы и технологии*. Москва: Наука, 2004. 320 с.
4. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. *Интеллектуальные системы управления. Теория и практика*. Москва: Радиотехника, 2009. 392 с.
5. Томпсон-мл. А. А., Стрикленд III А. Дж. *Стратегический менеджмент. Концепции и ситуации*. Москва: Вильямс, 2006. 928 с.
6. Шифрин М. Б. *Стратегический менеджмент*. Санкт-Петербург: Питер, 2007. 320 с.

7. Лисицкий В., Гернет Н. *Прогнозирование и планирование переходных процессов в организациях*. Saarbrücken LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 364 с.
8. Поспелов Д. А. *Ситуационное управление. Теория и практика*. Москва: Наука, 2007. 228 с.
9. Карпов Л. Е., Юдин В. Н. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов. *Труды Института системного программирования РАН*. 2007. Т. 13, Ч. 2. С. 37–58.
10. Кужелев П. Д. Управление на основе метода прецедентов. *Вестник МГТУ МИРЭА*. Москва: РТУ МИРЭА, 2014. № 4 (5). С. 172–182.
11. Саати Т. *Принятие решений: метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
12. Глухих И. Н. *Интеллектуальные информационные системы*. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 136 с.
13. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. *Базы знаний интеллектуальных систем*. Санкт-Петербург: Питер, 2001. 384 с.
14. Корнеев В. В., Гареев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. *Базы данных. Интеллектуальная обработка информации*. Москва: Нолидж, 2001. 400 с.
15. Tsvetkov V. Ya. Cognitive information models. *Life Science Journal*. 2014. Т. 11, № 4. С. 128–133.
16. Романов В. П. *Интеллектуальные информационные системы в экономике*. Москва: Экзамен, 2007. 496 с.
17. Титаренко Г. А. *Информационные технологии управления: Учебное пособие для вузов / ред. Титаренко Г. А.* Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 439 с.

References (transliterated)

1. Alekseeva M. B. *Metody i modeli diagnostiki sostoyaniya biznes-sistemy* [Methods and models for diagnosing the state of a business system]. Murmansk, Private educational institution of higher education "MOU" Publ., 2016. 84 p.
2. Makarov V. L., Varshavsky A. E. *Innovatsionnyi menedzhment v Rossii: voprosy strategicheskogo upravliniya i nauchno-technologicheskoi bezopasnosti* [Innovation management in Russia: issues of strategic management and scientific and technological security]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 316 p.
3. Sovetov B. Y., Tsekhanovsky V. V., Chertovsky V. D. *Intellektual'nye sistemy i tehnologii* [Intelligent systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 320 p.
4. Vasiliev V. I., Ilyasov B. G. *Intellektual'nye sistemy i tehnologii. Teoriya i praktika* [Intelligent control systems. Theory and practice]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p.
5. Thompson Arthur A., Strickland A. J. *Strategic Management: Concepts and Cases*. Boston, Mass.: McGraw-Hill/Irwin, 2001. 928 p. (Russ. ed.: Thompson, A. A., Strickland, A. J. *Strategicheskii menedzhment. Kontseptsii i situatsii*. Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 928 p.)
6. Shifrin M. B. *Strategicheskii menedzhment* [Strategic management]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2007. 320 p.
7. Lisitsky V., Gernet N. *Prognozirovanie i planirovanie perehodnykh processov v organizatsiyah* [Predicting and planning organizational transitions]. Saarbrücken LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 364 p.
8. Pospelov D. A. *Situatsionnoe upravlenie. Teoriya i praktika* [Situational management. Theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 228 p.
9. Karpov L. E., Yudin V. N. Adaptivnoe upravlenie po precedentam, osnovannoe na klassifikacii sostoyanij upravlyаемых ob'ektov. [Adaptive use case management based on the classification of the states of managed objects]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya*. 2007, vol. 13, no 2, pp. 37–58.
10. Kuzhelev P. D. Upravlenie na osnove metoda pretsedentov [Management based on the precedent method]. *Vestnik MGTU MIREA*. [Herald of MSTU MIREA]. Moscow, Bulletin of MSTU MIREA Publ., 2014, no. 4, pp. 28–30.
11. Saaty Thomas L. *The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments*. New York. Plenum Press, 1984, 258 p. (Russ. ed.: Saaty T. *Prinjatije reshenij: metod analiza ierarhij*. Moscow, Radio and communication Publ., 1993. 278 p.)
12. Glukhikh I. N. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy* [Intelligent information systems]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2019. 136 p.

13. Gavrilova T. A., Khoroshevsky V. F. *Bazy znaniy intellektual'nyh system* [Knowledge base of intelligent systems]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001. 384 p.
14. Korneev V. V., Gareev A. F., Vasyutin S. V., Raikh V. V. *Bazy dannyh. Intellektual'naya obrabotka informatsii* [Database. Intelligent information processing]. Moscow, Nolidj Publ., 2001. 400 p.
15. Tsvetkov V. Ya. Cognitive information models. *Life Science Journal*. 2014, vol. 11, no. 4, pp. 128–133.
16. Romanov V. P. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy v ekonomike* [Intelligent information systems in the economy]. Moscow, Examen Publ., 2007. 496 p.
17. Titarenko G. A. *Informatsionnye tehnologii upravleniya: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Information Technologies of Management: Textbook for universities]. Moscow, Unity-Dana Publ., 2013. 423 p.

Received 20.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисицький Василь Лаврентійович – 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/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com

Бойко Марія Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7363-9209>; e-mail: mariaboy99@gmail.com

Лисицкий Василий Лаврентьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Программного инженерии и информационных технологий управления; м. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com

Бойко Мария Олеговна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студентка; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7363-9209>; e-mail: mariaboy99@gmail.com

Lysytskyi Vasyl Lavrentiyovych – candidate of technical sciences, docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», docent of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; . Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com

Boiko Mariia Olegivna – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», student; c. Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7363-9209>; e-mail: mariaboy99@gmail.com

УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

УДК 004.4.075

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.02

*М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, А. О. ГОЛОСКОКОВА, Г. О. БУРЛАКОВ***ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ РОЗВИТКУ ПІДМНОЖИНИ ПРОЦЕСІВ ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ ЗРІЛОСТІ SPICE**

Стисло розглянуто об'єкт дослідження – процес розробки програмного забезпечення (ПР ПЗ). Відзначено, що першими кроками удосконалення процесу життєвого циклу (ЖЦ) програмних систем є оцінка потужності (зрілості) процесів і на цій основі розробка плану програми їх вдосконалення. До основних підходів поліпшення ПР відносяться моделі зрілості CMMI і SPICE. Проведено аналіз наукових робіт, присвячених їх формалізації. Зазначено, що значні результати в цьому напрямку досягнуто по відношенню до моделі CMMI. При цьому вона не враховує особливості ІТ-компанії, такі як: розмір компанії; моделі ЖЦ ПР ПЗ, які використовуються; особливості предметної області проєктів; цілі керівників ІТ-компанії. Тому було запропоновано на базі моделі SPICE створити аналог моделі CMMI, але з урахуванням цих особливостей, який названо SPICE INT. Побудова такої моделі є задачею структурно-параметричного синтезу. Поставлена задача параметричного синтезу, один з елементів якої – планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі SPICE. Проведена формалізація її основних понять і введено множини: груп процесів, категорій, процесів (підпроцесів), практик. На цій основі проведена формалізація оцінки рівня можливості окремої практики і на цій основі розроблено модель оцінки досягнутого рівня можливості процесу і ступеня досягнення більш високих рівнів. Синтезована функція витрат при переході підмножини процесів з $(t - 1)$ -го на t -й підперіод планування. Розроблена адитивна цільова функція, яка визначає інтегральну корисність покращення якості підмножини процесів моделі SPICE на плановому періоді $[1, T]$ в результаті розвитку ПР ПЗ. На основі цільової функції і обмежень на ресурси сформована динамічна модель планування розвитку підмножини процесів. Відзначено, що один з підходів до її вирішення є алгоритм «Київський веник».

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення, життєвий цикл, структурно-параметричний синтез, рівень можливості процесу, адитивна цільова функція, ресурсне обмеження, динамічна модель.

*М. Д. ГОДЛЕВСКИЙ, А. А. ГОЛОСКОКОВА, Г. А. БУРЛАКОВ***ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПОДМНОЖЕСТВА ПРОЦЕССОВ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ЗРЕЛОСТИ SPICE**

Кратко рассмотрен объект исследования – процесс разработки программного обеспечения (ПР ПО). Отмечено, что первыми шагами усовершенствования процесса жизненного цикла (ЖЦ) программных систем является оценка мощности (зрелости) процессов и на этой основе разработка плана программы их усовершенствования. К основным подходам улучшения ПР относятся модели зрелости CMMI и SPICE. Проведен анализ научных работ, посвященных их формализации. Указано, что значительные результаты в этом направлении достигнуты по отношению к модели CMMI. При этом она не учитывает особенности ИТ-компания, такие как: размер компании; используемые модели ЖЦ ПР ПО; особенности предметной области проєктов; цели руководителей ИТ-компания. Поэтому было предложено на базе модели SPICE создать аналог модели CMMI, но с учетом этих особенностей, который назван SPICE INT. Построение такой модели является задачей структурно-параметрического синтеза. Поставлена задача параметрического синтеза, один из элементов которой – планирование развития подмножества процессов эталонной модели SPICE. Проведена формализация ее основных понятий и введены множества: групп процессов, категорий, процессов (подпроцессов), практик. На этой основе проведена формализация оценки уровня возможности отдельной практики и на этой основе разработана модель оценки достигнутого уровня возможности процесса и степени достижения более высоких уровней. Синтезирована функция затрат при переходе подмножества процессов с $(t - 1)$ -го на t -й подперіод планирования. Разработана адитивная целевая функция, определяющая интегральную полезность улучшения качества подмножества процессов модели SPICE на плановом периоде $[1, T]$ в результате развития ПР ПО. На основе целевой функции и ограничений на ресурсы сформирована динамическая модель планирования развития подмножества процессов. Отмечено, что один из подходов к ее решению является алгоритм «Київський веник».

Ключевые слова: процесс разработки программного обеспечения, жизненный цикл, структурно-параметрический синтез, уровень возможности процесса, адитивная целевая функция, ресурсное ограничение, динамическая модель.

*M. D. GODLEVSKIY, A. A. GOLOSKOKOVA, G. A. BURLAKOV***A DYNAMIC MODEL FOR DEVELOPMENT PLANNING OF PROCESS SUBSETS FOR THE SPICE REFERENCE MATURITY MODEL**

The object of the research is briefly considered, namely, the software development process (SDP). It is noted that the first steps in improving the life cycle (LC) process of software systems is to assess the capacity (maturity) of processes and, within this framework, to develop a plan for their improvement program. The main approaches to improving DP include the CMMI and SPICE maturity models. The analysis of the studies devoted to their formalization is carried out. It is indicated that significant results in this direction have been achieved in relation to the CMMI model. However, it does not consider the characteristics of an IT company, such as: the company size; used models of software DP life cycle; features of the projects subject

© М. Д. Годлевський, А. О. Голоскокова, Г. О. Бурлаков, 2020

area; IT company leaders' goals. Therefore, it was proposed to create an analogue of the CMMI model based on the SPICE model, but taking into account these features, which is called SPICE INT. The construction of such a model is the task of structural and parametric synthesis. The problem of parametric synthesis is set, one of the elements of which is the development planning for process subsets for the SPICE reference model. The formalization of its basic concepts is carried out and sets are introduced: groups of processes, categories, processes (sub-processes), practices. On this basis, the formalization of the possibility level assessment of a particular practice was carried out, and within this framework, a model was developed for assessing the achieved level of the process capability and the degree of achievement for higher levels. The cost function is synthesized for the transition of process subsets from the $(t - 1)$ -st to the t -th planning sub-period. An additive objective function has been developed that determines the integral relevance for subset quality improvement for the SPICE model processes in the planned period $[1, T]$ as a result of the development of the DP software. Based on the objective function and resource constraints, a dynamic model for planning the development of a subset of processes is formed. It is noted that one of the approaches to its solution is the "Kiev broom" algorithm.

Key words: software development process, life cycle, structural and parametric synthesis, process capability level, additive objective function, resource constraint, dynamic model

Вступ. Центральним об'єктом вивчення програмної інженерії є процес розробки (ПР) програмного забезпечення (ПЗ). Це безліч різних видів діяльності, методів, методик і кроків, які використовуються для розробки та еволюції ПЗ, і пов'язаних з цим продуктів (документації, програмного коду, тестів і т. ін.) [1]. Удосконалення діючих в організації процесів – одна з головних задач інженерії якості програмних систем (ПС). Відповідно до стандарту ISO/IEC TR 15504-7 першими кроками удосконалення процесів життєвого циклу (ЖЦ) ПС є оцінка потужності процесів і на цій основі розробка плану програми їх удосконалення. Термін «потужність» розглядається як синонім наступних понять: зрілість, досконалість, потенціал. Зрілість ПР ПЗ можна характеризувати як ступінь чіткості: визначення, управління, вимірювання, контролю і виконання усього ПР ПЗ або окремих складових.

Серед підходів до покращення ПР можна виділити такі, які базуються на стандарті ISO-9001:2000 [2], понятті моделі зрілості [3, 4], технології Six Sigma [5], та інші. Одна з головних задач по відношенню до моделей зрілості – це їх формалізація і використання не тільки для оцінки рівня зрілості окремого процесу або усього процесу розробки ПЗ, а і можливості планування їх розвитку у часі в умовах обмежених ресурсів. Це дозволяє керівництву компанії розробника ПЗ сформулювати стратегію просування фірми до більш високого рівня зрілості. На теперішній час такі дослідження, в основному, проведено по відношенню до моделі CMMI. У роботі [6] вперше наведено формалізацію основних понять моделі зрілості CMMI. Введено змінні, які визначають рівень можливості окремої практики фокусної області у t -й підперіод планування, де $t \in [1, T]$; T – кількість підперіодів планового періоду. На основі цих змінних визначається рівень можливості фокусної області і далі формується функція рівня приналежності до k -го рівня зрілості усього ПР ПЗ, де $k = \overline{1, 5}$. Роботи [7, 8] присвячені розробці та реалізації динамічної моделі планування покращення якості ПР ПЗ на плановому періоді $[1, T]$. У роботах [9, 10] розроблено метод просування ПР ПЗ організації до більш високого рівня зрілості, який базується на ковзному плануванні та дозволяє за рахунок статичної моделі підвищити точність результату, а за рахунок спрощеної динамічної моделі зменшити розмірність задачі. Першою використовується динамічна задача на плановому періоді $[1, T]$, результати якої є основою для вирішення статичної задачі на першому підперіоді планування. Далі

динамічна задача розглядається на періоді $[2, T + 1]$ з урахуванням результатів статичної задачі, яка далі розглядається вже на другому підперіоді і т. д.

Перші спроби формалізації моделі зрілості SPICE наведені у роботі [11], яка присвячена структурному синтезу моделі зрілості SPICE INTEGRATION на основі еталонної моделі SPICE. У роботі [12] наведено шляхи підвищення якості ПР ПЗ, які базуються на моделях зрілості і в першу чергу CMMI та SPICE. Все це засвідчує актуальність досліджень присвячених формалізації моделі зрілості SPICE та побудові моделей планування покращення процесів еталонної моделі зрілості SPICE.

Постановка та ціль задачі дослідження. Як було сказано вище, удосконалення існуючих в організації процесів – одна з головних задач інженерії програмного забезпечення. Внесення удосконалень проводиться з погляду цілей і пріоритетів організації розробника ПЗ. Зазвичай цілі удосконалень визначаються кількісно і погоджуються усіма зацікавленими сторонами. Далі вони оформлюються у вигляді програми удосконалення процесу або множини процесів. На теперішній час для розробки програми удосконалення формалізована модель зрілості CMMI, на базі якої сформовані моделі, алгоритми та інформаційна технологія, які дозволяють вирішити задачу планування покращення якості окремого процесу, так і всього ПР ПЗ організації. Але розроблені моделі та алгоритми, які формалізують модель CMMI, не дозволяють враховувати особливості IT-компанії [12]:

- розмір компанії розробника ПЗ;
- особливості методології управління проектами і моделі ЖЦ ПР ПЗ, які використовуються в організації;
- особливості предметної області розробки ПЗ;
- цілі IT-організації (розвиток, стабільне існування і т. ін.).

Тому будемо вважати доцільним подальшу розробку аналога моделі зрілості CMMI на базі SPICE, який будемо називати SPICE INTEGRATION (INT) [11]. Його ціль – враховувати особливості IT-організації для планування покращення якості не окремого процесу, а всього ПР ПЗ організації. Модель SPICE INT буде унікальною для кожної окремої організації і тому може використовуватися тільки для внутрішнього аудиту та раціонального (оптимального) розвитку ПР ПЗ на основі цілей керівництва компанії. Отже, сформована програма розвитку буде більш доцільною з огляду на інтереси IT-компанії у порівнянні з планом розвитку за моделлю CMMI.

Для побудови моделі зрілості SPICE INT необхідно відповідати на наступні питання:

1. Які особливості IT-компанії необхідно враховувати при побудові для неї моделі SPICE INT.
2. Який тип шкали зрілості необхідно використовувати?
3. Скільки рівнів зрілості повинна мати шкала?
4. Скільки і які процеси повинні розглядатися на кожному рівні зрілості ПП ПЗ організації?
5. Яким рівням можливості повинні відповідати процеси, які розташовані на відповідних рівнях зрілості?

Надано основні питання, але може бути безліч інших. Наприклад, яким чином визначаються пріоритети множини практик, з яких формується процес і т. ін.

Формування моделі зрілості SPICE INT є задачею структурно-параметричного синтезу. До структурного синтезу необхідно віднести визначення типу шкали, кількість рівнів зрілості і перелік процесів, які необхідно використовувати на кожному рівні. До параметричного синтезу відноситься визначення рівнів можливості окремих процесів на кожному рівні зрілості. Необхідно відрізнити побудову моделі зрілості SPICE INT і формування моделей оцінки та планування розвитку ПП ПЗ організації на її основі. Для цього необхідно сформулювати критерії розвитку ПП ПЗ різного роду обмеження, у тому числі ресурсні, пріоритети окремих практик, процесів і т. ін.

Ціллю роботи є побудова динамічної моделі планування розвитку множини окремих процесів моделі зрілості SPICE на плановому періоді $[1, T]$. Ця задача є складовою частиною структурно-параметричного синтезу формування моделі SPICE INT та синтезу моделі і алгоритму планування розвитку ПП ПЗ IT-компанії на основі SPICE INT. У вступі обґрунтована актуальність вирішення цієї задачі. Для досягнення поставленої цілі у роботі розглядаються та вирішуються такі питання:

- формалізація структури еталонної моделі зрілості SPICE;
- формалізація оцінки рівня можливості окремого процесу моделі SPICE;
- формування функції витрат при переході з $(t - 1)$ -го на t -й підперіод планування;
- синтез динамічної моделі планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE.

Завершується робота висновками та представленням шляхів подальших досліджень у напрямку структурно-параметричного синтезу моделі SPICE INT і розробки технології планування розвитку ПП ПЗ IT-організації на основі SPICE INT.

Формалізація структури еталонної моделі зрілості SPICE. Еталонна модель SPICE може бути використана для будь-якої організації розробника ПЗ. Ця модель не залежить від певної фірми, системи управління, моделей життєвого циклу ПЗ, технологій програмування і т. ін. У роботі [12] представлена структура еталонної моделі SPICE у вигляді табл. 5. З метою її формалізації і використання у динамічній моделі планування розвитку підмножини окремих

процесів ЖЦ введемо наступні позначення. G – множина груп процесів, які в еталонній моделі представлені трьома видами: основні процеси, допоміжні процеси, організаційні процеси. В свою чергу кожна g -та група процесів, $g \in G$ складається з певної множини категорій процесів K_g . Виходячи з еталонної моделі основні процеси містять наступні категорії.

1. Customer-supplier category (CUS) – процеси, що безпосередньо пов'язані зі споживачем.

2. Engineering category (ENG) – процеси, що встановлюють вимоги до системи і програмного продукту, процеси реалізації та супроводу.

Допоміжні процеси мають одну категорію. Це – Support category (SUP), які забезпечують і підвищують продуктивність інших процесів проекту.

Організаційні процеси мають наступні категорії.

1. Management category (MAN) – процеси запуску проекту та управління його ресурсами.

2. Organization category (ORG) – процеси, що визначають бізнес-цілі організації і дозволяють їх досягти.

В свою чергу кожна категорія $k \in K_g$ містить множину окремих процесів (підпроцесів) $P_{g,k}$ і кожний процес (підпроцес) $p \in P_{g,k}$ містить множину практик $I_{g,k}^p$. Тому практика $i \in I_{g,k}^p$. Наглядна інтерпретація структури еталонної моделі SPICE представлена на рис. 1.

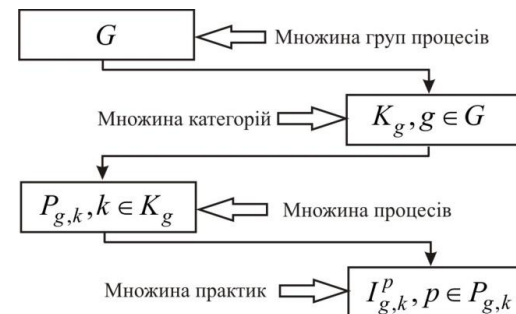


Рис. 1. Формалізація структури еталонної моделі SPICE

Формалізація оцінки рівня можливості окремого процесу моделі SPICE. Як було розглянуто вище, окремий процес містить в собі множину практик. Виконання кожної з них сприяє покращенню рівня можливості окремого процесу. Пропонується у подальшому для оцінки практик використовувати методіку оцінки рівня можливості процесу/під процесу еталонної моделі зрілості SPICE. Отже, рівень можливості процесу залежить від рівня можливості його практик і обчислюється як агрегований показник множини рівнів можливості практик, які він містить. Відповідно до [12] будемо рівень можливості окремої практики обчислювати наступним чином (табл. 1)

З метою формалізації оцінки рівня можливості окремого процесу еталонної моделі SPICE введемо дискретні змінні, які розкривають сутність позначень N, P, L, F , які наведено в табл. 1. Змінна $X_{g,k}^{pt}(i, \alpha)$ визначає ступінь володіння рисою атрибута α множини A , який відноситься до p -ї практики, i -го процесу, k -ї

категорії, g -ї групи процесів моделі SPICE у t -му підперіоді планування періоду $[1, T]$, де T – кількість підперіодів.

Таблиця 1 – Обчислення рівнів можливості окремої практики процесу моделі зрілості SPICE

Атрибути	Рівень можливості				
	1	2	3	4	5
1. Виконання практики	L/F	F	F	F	F
2. Управління виконанням		L/F	F	F	F
3. Управління робочими продуктами		L/F	F	F	F
4. Визначення практики			L/F	F	F
5. Забезпечення практики ресурсами			L/F	F	F
6. Вимірювання				L/F	F
7. Кількісне управління практикою				L/F	F
8. Зміна практики					L/F
9. Безперервне удосконалення					L/F

У нашому випадку множина A складається з дев'яти атрибутів, які наведено в табл. 1. Відповідно до табл. 6 роботи [12], в якій наведено ступінь володіння рисою окремих атрибутів, будемо вважати, що змінні $X_{g,k}^{it}(i, \alpha)$ приймають такі значення:

$$X_{g,k}^{pt}(i, \alpha) = \begin{cases} 1: N - \text{не володіє, [0\%–15\%];} \\ 2: P - \text{володіє частково, [16\%–50\%];} \\ 3: L - \text{володіє в основному, [51\%–85\%];} \\ 4: F - \text{володіє повністю, [86\%–100\%].} \end{cases} \quad (1)$$

Отже, кожний процес еталонної моделі зрілості SPICE у t -му підперіоді планування характеризується матрицею оцінок

$$X_{g,k}^{pt} = \{X_{g,k}^{pt}(i, \alpha), i \in I_{g,k}^p, \alpha = \overline{1, 9}\}, p \in P_{g,k}, k \in K_g, g \in G, t \in [1, T]. \quad (2)$$

Відповідно табл. 1 та змінній $X_{g,k}^{pt}(i, \alpha)$ введемо поняття граничної матриці оцінки рівня можливості окремої практики

$$\Lambda = \{\Lambda(\gamma, \alpha), \gamma = \overline{0, 5}, \alpha = \overline{1, 9}\}, \quad (3)$$

де γ – рівень можливості, α – номер атрибута. Додатково введено нульовий рівень можливості практики для якого всі атрибути рівні одиниці (табл. 2).

Таблиця 2 – Гранична матриця

Рівень можливості	Атрибути								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	3	3	1	1	1	1	1	1
3	4	4	4	3	3	1	1	1	1
4	4	4	4	4	4	3	3	1	1
5	4	4	4	4	4	4	4	3	3

Далі для кожного рівня можливості γ формується матриця «відповідності» $\Phi_{g,k}^{pt}(\gamma)$ шляхом порівняння матриці оцінок $X_{g,k}^{pt}$ та граничної матриці Λ наступним чином:

$$\Phi_{g,k}^{pt}(\gamma) = \begin{cases} \gamma \Phi_{g,k}^{pt}(i, \alpha) = \begin{cases} X_{g,k}^{pt}(i, \alpha): X_{g,k}^{pt}(i, \alpha) < \Lambda(\gamma, \alpha), \\ \Lambda(\gamma, \alpha): X_{g,k}^{pt}(i, \alpha) \geq \Lambda(\gamma, \alpha), \end{cases} \\ i \in I_{g,k}^p, \alpha = \overline{1, 9}, \\ p \in P_{g,k}, k \in K_g, g \in G, t \in [1, T], \gamma = \overline{0, 5}. \end{cases} \quad (4)$$

Вище було зазначено, що рівень можливості процесу є агрегованим показником рівнів можливості практик, які він містить. Будемо вважати, що кожна практика має свою вагу $\rho_{g,k}^{ip}$ по відношенню до агрегованого показника рівня можливості процесу. Тоді вагові коефіцієнти можуть бути обчислені на основі методології колективного експертного оцінювання (МКЕО) і задовольняють наступним умовам:

$$\rho_{g,k}^{ip} > 0 \quad \forall i \in I_{g,k}^p, \sum_{i \in I_{g,k}^p} \rho_{g,k}^{ip} = 1, p \in P_{g,k}, k \in K_g, g \in G. \quad (5)$$

Наступний крок – на основі матриць відповідності $\Phi_{g,k}^{pt}(\gamma)$ формування векторів відповідності для кожного рівня можливості γ :

$$M_{g,k}^{pt}(\gamma) = \begin{cases} M_{g,k}^{pt}(\gamma, \alpha) = \sum_{i \in I_{g,k}^p} \rho_{g,k}^{ip} \cdot \gamma \Phi_{g,k}^{pt}(i, \alpha), \\ \alpha = \overline{1, 9} \\ p \in P_{g,k}, g \in G, t \in [1, T], \gamma = \overline{0, 5}. \end{cases} \quad (6)$$

Рядки

$$\Lambda(\gamma) = \{\Lambda(\gamma, \alpha), \alpha = \overline{1, 9}\}, \gamma = \overline{0, 5}$$

граничної матриці Λ будемо називати еталонними векторами γ -рівня можливості. Пропонується вектор відповідності рівням можливості для p -го процесу еталонної моделі SPICE знаходити наступним чином:

$$\Theta_{g,k}^{pt} = \left\{ \Theta_{g,k}^{pt}(\gamma) = \frac{\|M_{g,k}^{pt}(\gamma)\|}{\|\Lambda(\gamma)\|}, \gamma = \overline{0, 5} \right\}. \quad (7)$$

Норми векторів розраховуються як Евклідові норми:

$$\|M_{g,k}^{pt}(\gamma)\| = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^9 [M_{g,k}^{pt}(\gamma, \alpha)]^2};$$

$$\|\Lambda(\gamma)\| = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^9 [\Lambda(\gamma, \alpha)]^2}.$$

Виходячи з розрахунку складових вектора $\Theta_{g,k}^{pt}$ кожна з них дорівнює або менше одиниці і більше нуля. Якщо γ -складова вектора $\Theta_{g,k}^{pt}$ дорівнює одиниці, то процес відповідає γ -рівню можливості. Якщо γ -складова менше одиниці, вона відповідає рівню досягнення процесом γ -рівня можливості. Отже, рівень можливості p -го процесу k -ї категорії g -ї групи процесів еталонної моделі зрілості SPICE у t -й підперіод визначається наступним чином:

$$L_{g,k}^{pt} = \begin{cases} s: \Theta_{g,k}^{pt}(\varphi) = 1, \varphi = \overline{0,5}; \Theta_{g,k}^{pt}(\lambda) < 1, \lambda = \overline{S+1,5} \\ 5: \Theta_{g,k}^{pt}(\varphi) = 1, \varphi = \overline{0,5}. \end{cases}$$

$$S = \overline{0,4}.$$

Модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE. Кожна задача прийняття рішень розглядається з погляду трьох груп критеріїв:

1) перша група – рівень досягнення поставленої мети з погляду цілей системи, яка розглядається. У нашому випадку це збільшення рівня можливості підмножини процесів;

2) друга група – ресурсне забезпечення для досягнення поставленої мети. У нашому випадку фінансові витрати;

3) третя група – час, необхідний для вирішення поставленої задачі. У роботі розглядається фіксований інтервал часу – плановий період $[1, T]$.

Тому модель формується для перших двох груп критеріїв з виділенням першої з двох груп у якості основного критерію, а критерій другої групи віднесено до обмежень.

Перейдемо до розгляду питання формування критерію задачі, який фактично пов'язаний зі збільшенням рівня можливості підмножини процесів моделі SPICE впродовж планового періоду $[1, T]$. Будемо вважати, що розглядається деяка підмножина \bar{G} груп процесів, для кожної g -ї групи підмножина \bar{K}_g категорій процесів і для кожної k -ї категорії – підмножина процесів (підпроцесів) $\bar{P}_{gk} \subseteq P_{gk}$, де $\bar{G} \subseteq G$, $\bar{K}_g \subseteq K_g$. Введемо поняття інтегрального рівня можливості підмножини процесів. Виходячи з (7) кожний p -й процес досягає γ -рівень можливості при умові $\Theta_{gk}^{pt}(\gamma) = 1$. Якщо $\Theta_{gk}^{pt}(\gamma) < 1$, будемо вважати, що ступінь досягнення γ -рівня можливості p -го процесу дорівнює $\Theta_{gk}^{pt}(\gamma)$. Тоді можна вважати, що інтегральний рівень можливості p -го процесу у t -му підперіоді планування визначається наступним чином:

$$\bar{\Theta}_{gk}^{pt} = \prod_{\gamma=1}^5 \Theta_{gk}^{pt}(\gamma), p \in \bar{P}_{gk}, k \in \bar{K}_g, g \in \bar{G}, \quad (8)$$

$$t \in [1, T].$$

Нульовий рівень можливості вважається досягнутим по визначенню і тому $\gamma = \overline{1,5}$.

Будемо вважати, що процесам k -ї категорії та g -ї групи; категоріям процесів g -ї групи; групам процесів, які розглядаються, еталонної моделі SPICE відповідають вектори вагових коефіцієнтів $\{\bar{\rho}_{gk}^p\}$, $\{\bar{\rho}_{gk}\}$, $\{\tilde{\rho}_g\}$, які можуть бути призначені (знайдені) на основі МКЕО і задовольняють наступним вимогам:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\rho}_{gk}^p > 0 \quad \forall p \in \bar{P}_{gk}; \quad \sum_{p \in \bar{P}_{gk}} \bar{\rho}_{gk}^p = 1, k \in \bar{K}_g, g \in \bar{G}; \\ \bar{\rho}_{gk} > 0 \quad \forall k \in \bar{K}_g; \quad \sum_{k \in \bar{K}_g} \bar{\rho}_{gk} = 1, g \in \bar{G}; \\ \tilde{\rho}_g > 0 \quad \forall g \in \bar{G}; \quad \sum_{g \in \bar{G}} \tilde{\rho}_g = 1. \end{aligned} \right\} (9)$$

Тоді інтегральний рівень можливості підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE у t -му підперіоді планування визначається наступним чином:

$$\Sigma^t = \sum_{g \in \bar{G}} \tilde{\rho}_g \sum_{k \in \bar{K}_g} \bar{\rho}_{gk} \sum_{p \in \bar{P}_{gk}} \bar{\rho}_{gk}^p \cdot \bar{\Theta}_{gk}^{pt}. \quad (10)$$

Відповідно до (2) кожний процес у t -му підперіоді характеризується матрицею оцінок. Динамічна модель формується для підмножини процесів моделі SPICE. Тому у подальшому будемо працювати з матрицями

$$\bar{X}^t = \begin{cases} X_{gk}^{pt}(t, \alpha), i \in I_{gk}^p, \alpha = \overline{1,9}, p \in \bar{P}_{gk}, \\ k \in \bar{K}_g, g \in \bar{G} \\ t \in [1, T] \end{cases}, \quad (11)$$

і вважати, що інтегральний рівень можливості є функцією від матриць оцінок і має наступний вигляд:

$$\Sigma^t = \bar{F}^t(\bar{X}^t). \quad (12)$$

Тоді приріст рівня можливості підмножини процесів моделі SPICE визначається наступним чином

$$\bar{\Phi}_t(\bar{X}^{t-1}, \bar{X}^t) = \bar{F}^t(\bar{X}^t) - \bar{F}^t(\bar{X}^{t-1}). \quad (13)$$

Чим раніше буде приріст, тим більше підперіодів він буде впливати на інтегральний рівень можливості. Тому логічно ввести вагові коефіцієнти важливості окремих підперіодів планування:

$$\xi_t > 0, \quad t \in [1, T], \quad \sum_{t \in [1, T]} \xi_t = 1. \quad (14)$$

Тоді приріст інтегрального рівня можливості записується у наступному вигляді:

$$\Phi_t(\bar{X}^{t-1}, \bar{X}^t) = \xi_t \cdot \bar{\Phi}_t(\bar{X}^{t-1}, \bar{X}^t). \quad (15)$$

У підсумку адитивна цільова функція, яка визначає показник збільшення інтегрального рівня можливості підмножини процесів на всьому плановому періоді записується наступним чином:

$$F(\bar{X}) = \sum_{t \in [1, T]} \Phi_t(\bar{X}^{t-1}, \bar{X}^t), \quad (16)$$

де $\bar{X} = \{\bar{X}^t, t \in [1, T]\}$.

Перейдемо до розгляду питання формування витрат на $(t - 1)$ -му підперіоді планування, які забезпечують приріст інтегрального рівня можливості підмножини процесів моделі SPICE, починаючи з t -го підперіода на величину, яка визначається відповідно (15). З цією метою введемо трикутні ресурсні матриці атрибутів практик, які визначають необхідні фінансові ресурси для підвищення ступеня володіння рисою окремих атрибутів. Таких ступенів володіння чотири (табл. 6 [12]). Окремі елементи цих матриць задовольняють наступним умовам:

$$\begin{aligned} r_{gk}^p(i, \alpha) [X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha), X_{gk}^{pt}(i, \alpha)] &\geq 0: \\ X_{gk}^{pt}(i, \alpha) &> X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha); \\ r_{gk}^p(i, \alpha) [X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha), X_{gk}^{pt}(i, \alpha)] &= 0: \\ X_{gk}^{pt}(i, \alpha) &\leq X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha). \end{aligned}$$

Якщо вважати, що на періоді планування $[0, 1 - T]$ будь-який атрибут практик процесів, які розглядаються, є потенційним об'єктом укладання фінансових ресурсів, тоді фінансові витрати на $(t - 1)$ -му підперіоді планування визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{R}_t(\bar{X}^{t-1}, \bar{X}^t) &= \sum_{g \in \bar{G}} \sum_{k \in \bar{K}_g} \sum_{p \in \bar{P}_{gk}} \sum_{i \in I_{gk}^p} \sum_{\alpha=1}^9 r_{gk}^p(i, \alpha) \times \\ &\times [X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha), X_{gk}^{pt}(i, \alpha)], \quad t \in [1, T] \end{aligned} \quad (17)$$

при умові

$$\begin{aligned} X_{gk}^{pt}(i, \alpha) &\geq X_{gk}^{pt-1}(i, \alpha), \quad \alpha = \overline{1, 9}, \quad i \in I_{gk}^p, \\ p &\in \bar{P}_{gk}, \quad k \in \bar{K}_g, \quad g \in \bar{G}, \quad t \in [1, T]. \end{aligned} \quad (18)$$

Будемо вважати, що на кожному підперіоді t на розвиток підмножини процесів моделі SPICE виділяють ресурси в об'ємі R_t і ресурси, які не використані на t -му підперіоді, можуть бути використані на наступних підперіодах планування. Тоді ресурсне обмеження записується наступним чином:

$$\sum_{\tau=1}^t \bar{R}_\tau(\bar{X}^{\tau-1}, \bar{X}^\tau) \leq \sum_{\tau=0}^{t-1} R_\tau = \hat{R}^{t-1}, \quad t \in [1, T]. \quad (19)$$

В результаті динамічна модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE записується наступним чином. Знайти оптимальне значення матриці $\bar{X} = \bar{X}^*$, яке забезпечує максимальне значення критерію (16) при умовах (1), (3)–(15), (17)–(19).

Висновки, шляхи подальших досліджень. На основі поставленої мети у роботі проведено: формалізацію структури еталонної моделі зрілості SPICE; формування функції витрат при переході з $(t - 1)$ -го на t -й підперіод планування; формування цільової

функції моделі. В результаті представлена динамічна модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE, на основі якої керівництво IT-компанії може сформулювати стратегію просування фірми до більш високого рівня зрілості ПР ПЗ в умовах обмежених ресурсів.

Подальші дослідження будуть присвячені структурно-параметричному синтезу моделі SPICE INT, на основі якої буде розроблено аналог моделі CMMI і використано SPICE INT для планування розвитку ПР ПЗ компанії з урахуванням її особливостей.

Список літератури

1. Кознов Д. В. *Введение в программную инженерию: учебный курс*. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2009. 154 с.
2. Schlickman J. ISO 9001:2000 *Quality Management System Design*. Artech House, 2003. 406 p.
3. Mutafelija B. *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Auerbach Pubs, 2009. 406 p.
4. Chrissis M. B., Konrad M., Shrum S. *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*. Addison-Wesley, 2003. 688 p.
5. Pyzdek T., Keller P. A. *The Six Sigma Handbook*. 5-th Ed. New Yourk : McGraw-Hill Education, 2018. 20 p.
6. Годлевский М. Д., Шеховцов В. А., Брагинский И. Л. Принципы моделирования оценки и управления качеством процесса разработки программного обеспечения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2012, № 5/3 (59). С. 45–49.
7. Годлевский М. Д., Брагинский И. Л. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости. *Проблемы информационных технологий*. Херсон: ОЛДИ-Плюс, 2012. С. 6–13.
8. Годлевский М. Д., Брагинский И. Л. Информационная технология управления качеством процесса разработки программного обеспечения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2013, № 2/9 (62). С. 63–67.
9. Годлевский М. Д., Голоскокова А. А. Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. № 3/2 (75). С. 23–29.
10. Годлевский М. Д., Рубин Э. Е., Голоскокова А. А. Динамическая модель планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 58 (1167). С. 3–6.
11. Рубин Э. Е., Годлевский М. Д., Бараш В. С. Структурный синтез модели зрелости SPICE INTEGRATION. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 58 (1167). С. 77–81.
12. Годлевский М. Д., Гончаренко Т. С., Бурлаков Г. О., Малець Д. К. Шляхи підвищення якості процесу розробки програмного забезпечення на основі моделей зрілості. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 2. С. 63–69.

References (transliterated)

1. Koznov D. V. *Vvedeny'e v programnuyu y'nzheneriy'u: uchebnyj kurs* [Introduction to software engineering: a training course]. Sankt-Peterburg: SPbGU Publ., 2009. 154 p.
2. Schlickman J. ISO 9001:2000 *Quality Management System Design*. Artech House, 2003. 406 p.
3. Mutafelija B. *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Auerbach Pubs, 2009. 406 p.
4. Chrissis M. B., Konrad M., Shrum S. *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*. Addison-Wesley, 2003. 688 p.
5. Pyzdek T., Keller P. A. *The Six Sigma Handbook*. 5-th Ed. New Yourk : McGraw-Hill Education, 2018. 20 p.

6. Hodlevskyy M. D., Shekhovtsov V. A., Brahnyskyy Y. L. Pryntsyyp modelyrovanyya otsenky y upravlenyya kachestvom protsessu razrabotky prohrammnoho obespechenyya [Principles of modeling evaluation and quality management of the software development process]. *Vostochno-Evropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohyy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Khar'kov, 2012, no. 5/3 (59), pp. 45–49
7. Hodlevskyy M. D., Brahnyskyy Y. L. Dynamicheskaya model' y alhorytm upravlenyya kachestvom protsessu razrabotky prohrammnykh system na osnove modely zrelosti [Dynamic model and algorithm for quality management of the software systems development process based on the maturity model]. *Problemy ynformatsyonnykh tekhnolohyy* [Information Technology Issues]. Kherson: OLDY-Plyus Publ., 2012, pp. 6–13.
8. Hodlevskyy M. D., Brahnyskyy Y. L. Ynformatsyonnaya tekhnolohyya upravlenyya kachestvom protsessu razrabotky prohrammnoho obespechenyya [Information technology for quality management of the software development process]. *Vostochno-Evropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohyy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Khar'kov, 2013, no. 2/9 (62), pp. 63–67.
9. Hodlevskyy M. D., Holoskokova A. A. Syntez statycheskykh modeley planyrovanyya uluchshenyya kachestva protsessu razrabotky prohrammnoho obespechenyya [Synthesis of static planning models for improving the quality of the software development process]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Kharkiv, 2015, no. 3/2 (75), pp. 23–29.
10. Hodlevskyy M. D., Rubyn E. E., Holoskokova A. A. Dynamicheskaya model' planyrovanyya uluchshenyya kachestva protsessu razrabotky prohrammnoho obespechenyya [Dynamic planning model for improving the quality of the software development process]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 58 (1167), pp. 3–6.
11. Rubyn E. E., Hodlevskyy M. D., Barash V. S. Strukturnyy syntez modeley zrelosti SPICE INTEGRATION [Structural synthesis of the SPICE INTEGRATION maturity model]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkov : NTU «KhPI» Publ., 2015, no. 58 (1167), pp. 77–81.
12. Hodlevskyy M. D., Honcharenko T. Ye., Burlakov H. O., Malets' D. K. Shlyakhy pidvyshchennya yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya na osnovi modeley zrilosti [Ways to improve the quality of the software development process based on maturity models]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkov : NTU «KhPI» Publ., 2019, no. 2, pp. 63–69.

Hadziuua(received) 21.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Годлевський Михайло Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua.

Голоскокова Анна Олександрівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9012-7889>; e-mail: Anna.Goloskokova@khpi.edu.ua

Бурлаков Георгій Олександрович – «SheerChain» ОУ, головний виконуючий директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0423-6024>; e-mail: george@sheerchain.com.

Годлевский Михаил Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой программной инженерии и информационных технологий управления; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua.

Голоскокова Анна Александровна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9012-7889>; e-mail: Anna.Goloskokova@khpi.edu.ua

Бурлаков Георгий Александрович – «SheerChain» ОУ, главный исполнительный директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0423-6024>; e-mail: george@sheerchain.com.

Godlevskiy Mykhaylo Dmytrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Department of Software Engineering and Management Information Technologies; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua.

Goloskokova Anna A. – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the "Software Engineering and Management Information Technologies" department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9012-7889>; e-mail: Anna.Goloskokova@khpi.edu.ua

Burlakov Heorhii Oleksandrovych – «SheerChain» ОУ, Chief Executive Officer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0423-6024>; e-mail: george@sheerchain.com.

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 519.876.2

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.03

I. П. ГАМАЮН, С. І. ЄРШОВА

МЕТОДИ КОМПРОМІСНОГО ВИБОРУ ІНТЕРВАЛУ ЗМІН МОДЕЛЬНОГО ЧАСУ В ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЯХ

Розглядаються процес імітаційного моделювання як один з основних засобів для вивчення динаміки функціонування реальних систем, зокрема, складних. Система може бути представлена сукупністю компонент. Функціонування компонента представляється реалізацією множини функціональних дій, які представляються відповідними активностями у вигляді пари: алгоритм виконання функціональної дії – тривалість виконання. Проблема відображення в ІМ одночасного або паралельного характеру функціонування всіх компонентів складної системи вирішується введенням модельного або системного часу. Основними методами введення модельного часу є метод фіксованого кроку та метод змінного кроку. В методі фіксованого кроку важливою проблемою є вибір величини інтервалу зміни модельного часу. Існуючі рекомендації для вибору величини інтервалу зміни модельного часу мають якісний характер і їх використання дозволяє підвищити точність моделювання, але при цьому зростають витрати ресурсу часу комп'ютера. Запропоновано при виборі величини інтервалу зміни модельного часу використовувати кількісні оцінки значень критеріїв якості – точність і витрати ресурсу часу комп'ютера. Узагальнений критерій представляється зваженою сумою перетворень локальних критеріїв. Значення коефіцієнтів, на які множаться відповідні перетворення, висловлюють переваги особи, що приймає рішення, локальним критеріям оптимальності. Наводиться геометрична інтерпретація процесу визначення компромісної альтернативи на множині ефективних альтернатив для різних випадків важливості локальних критеріїв. Ці оцінки дозволяють обґрунтувати характер зміни критеріїв якості для різних варіантів значень інтервалу зміни модельного часу та використовувати їх для вибору компромісного варіанту серед ефективних шляхом мінімізації узагальненого критерію. Вибір компромісного значення інтервалу зміни модельного часу реалізується в управляючій програмі моделювання.

Ключові слова: складна система, імітаційне моделювання, імітаційні моделі, модельний час, методи, компромісний вибір.

I. П. ГАМАЮН, С. И. ЕРШОВА

МЕТОДЫ КОМПРОМІСНОГО ВИБОРА ІНТЕРВАЛА МОДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЯХ

Рассматриваются процесс имитационного моделирования как одно из основных средств для изучения динамики функционирования реальных систем, в частности, сложных. Система может быть представлена совокупностью компонентов. Функционирование компонента представляется реализацией множества функциональных действий, которые представляются соответствующими активностями в виде пары: алгоритм выполнения функционального действия - продолжительность выполнения. Проблема отображения в ИМ одновременного или параллельного характера функционирования всех компонентов сложной системы решается введением модельного или системного времени. Основными методами введения модельного времени является метод фиксированного шага и метод переменного шага. В методе фиксированного шага важной проблемой является выбор величины интервала изменения модельного времени. Существующие рекомендации для выбора величины интервала изменения модельного времени имеют качественный характер и их использование позволяет повысить точность моделирования, но при этом растут затраты ресурса времени компьютера. Предложены при выборе величины интервала изменения модельного времени использовать количественные оценки значений критериев качества - точность и расходы ресурса времени компьютера. Обобщенный критерий представляется взвешенной суммой преобразований локальных критериев. Значения коэффициентов, на которые умножаются соответствующие преобразования, выражают предпочтения лица, принимающего решения, локальным критериям оптимальности. Приводится геометрическая интерпретация процесса определения компромиссной альтернативы на множестве эффективных альтернатив для различных случаев важности локальных критериев. Эти оценки позволяют обосновать характер изменения критериев качества для различных вариантов значений интервала изменения модельного времени и использовать их для выбора компромиссного варианта среди эффективных путем минимизации обобщенного критерия. Выбор компромиссного значения интервала изменения модельного времени реализуется в управляющей программе моделирования.

Ключевые слова: сложная система, имитационное моделирование, имитационные модели, модельное время, методы, компромиссный выбор.

I. P. GAMAYUN, S. I. YERSHOVA

METHOD OF COMPROMISE CHOICE OF INTERVAL OF MODEL TIME CHANGE IN IMITATION MODEL

The process of simulation is considered as one of the main means for studying the dynamics of functioning of real systems, in particular, complex ones. The system can be represented by a set of components. The functioning of a component is represented by the implementation of a set of functional actions, which are represented by the corresponding activities in the form of a pair: algorithm for performing a functional action - duration of execution.

© I. П. Гамаюн, С. І. Єршова, 2020

The problem of displaying the simultaneous or parallel nature of the functioning of all components of a complex system in the MI is solved by introducing model or system time. The main methods for introducing model time are the fixed step method and the variable step method. In the fixed-step method, an important problem is the choice of the value of the model time variation interval. The existing recommendations for choosing the value of the interval for changing the model time are of a qualitative nature and their use makes it possible to increase the accuracy of modeling, but at the same time the consumption of the computer time resource increases. It is proposed to use quantitative estimates of the values of quality criteria - the accuracy and expenditure of the computer time resource when choosing the value of the model time change interval. The generalized criterion is represented as a weighted sum of transformations of local criteria. The values of the coefficients by which the corresponding transformations are multiplied express the preferences of the decision-maker for the local optimality criteria. A geometric interpretation of the process of determining a compromise alternative on a set of effective alternatives for various cases of the importance of local criteria is given. These estimates make it possible to substantiate the nature of the change in the quality criteria for various variants of the values of the interval of change in the model time and to use them to select a compromise option among the effective ones by minimizing the generalized criterion. The choice of the compromise value of the model time variation interval is implemented in the control simulation program.

Keywords: complex system, simulation modeling, simulation models, model time, methods, compromise choice.

Вступ. Імітаційне моделювання (ІМ) в наш час є одним з основних інструментальних засобів для вивчення динаміки функціонування реальних систем різного виду, які, як правило, відносяться до класу складних систем [1–9]. При цьому система S , яка вивчається, представляється безліччю компонентів K_i ($i \in \overline{1, n}$), тобто $S^* = \{K_i | i \in \overline{1, n}\}$. Функціонування компонента K_i ($i \in \overline{1, n}$), представляється реалізацією деякої множини функціональних дій $\{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$ згідно встановленому порядку (последовності), що задається відносинами передування. Наприклад:

$$\forall i \in \overline{1, n} : \Phi D_{i1} < \Phi D_{i2} < \dots < \Phi D_{ij} < \dots < \Phi D_{im_i}.$$

В ІМ для вивчення динаміки функціонування системи S функціональні дії $\{\Phi D_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}\}$ представляються відповідними активностями $\{AK_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}\}$. Кожна активність AK_{ij} наближено виражає відповідну функціональну дію ΦD_{ij} та представляється у вигляді пари:

$$i \in \overline{1, n}; \forall j \in \overline{1, m_i} : AK_{ij} = \langle AL_{ij}, \tau_{ij} \rangle,$$

де AL_{ij} – алгоритм, що наближено відображає виконання функціональної дії ΦD_{ij} , а τ_{ij} – тривалість її виконання.

Динаміка функціонування кожної компоненти K_i ($i \in \overline{1, n}$) описується зміною її стану в локальному часі t_i ($i \in \overline{1, n}$). При цьому функціональні дії $\{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$ компоненти K_i ($i \in \overline{1, n}$) в ІМ реалізуються відповідними активностями $\{AK_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$, так, що з початку при фіксованому значенні локальної координати t_i ($i \in \overline{1, n}$) виконується алгоритм AL_{ij} активності AK_{ij} , а потім локальна координата t_i змінюється на величину τ_{ij} . У результаті в ІМ відбувається подія C_{ij} в момент локального часу t_{ij} . Змістовність події C_{ij} означає, що активність AK_{ij} реалізована в ІМ.

Надалі моделюється виконання наступної функціональної дії ΦD_{ij+1} так, що у фіксований момент локального часу t_{ij} виконується алгоритм AL_{ij+1} активності AK_{ij+1} , а потім змінюється локальний час t_i на величину τ_{ij+1} . В момент локального часу $t_{ij+1} = t_{ij} + \tau_{ij+1}$ в ІМ відбувається ще одна подія C_{ij+1} , що відображає завершення функціональної дії ΦD_{ij+1} .

Динаміка функціонування компоненти K_i ($i \in \overline{1, n}$) в ІМ буде представлена повністю в момент локального часу t_{im_i} , коли настає подія C_{im_i} , яка відображає завершення останньої функціональної дії ΦD_{im_i} компоненти, яка розглядається.

В складній системі $S = \{K_i | i \in \overline{1, n}\}$ всі її складові компоненти функціонують одночасно або паралельно. У ІМ основним засобом обробки інформації є комп'ютер, який в кожний момент часу обробляє інформацію тільки одного з компонентів, що зводиться до виконання деякого алгоритму AL_{ij} та зміну значення відповідної локальної координати t_i . Таким чином, виникає проблема відображення в ІМ одночасного або паралельного характеру функціонування всіх компонентів складної системи.

Ця проблема вирішується введенням модельного або системного часу, який зазвичай позначається як t_0 . За допомогою цього часу в ІМ встановлюється порядок обробки інформації в різних компонентах системи комп'ютером, що працює послідовно. Основними методами введення модельного часу є метод фіксованого кроку або постійного інтервалу та метод змінного кроку або кроку до наступної події. Їх ще інакше називають принципом Δt та принципом δz відповідно [2, 7].

Використання кожного з цих методів в ІМ істотно залежить від характеру розподілу моментів часу t_{ij} ($i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}$).

Постановка задачі. В методі фіксованого кроку або постійного інтервалу важливою проблемою є вибір величини інтервалу зміни модельного часу Δt .

Існуючі рекомендації для вибору мають якісний характер і зводяться, як правило, до того що зменшення Δt дозволяє підвищити точність моделювання, але при цьому зростають витрати ресурсу часу комп'ютера.

В статті розглядаються кількісні оцінки значень двох використовуваних при виборі критеріїв якості - точності і витрат ресурсу часу комп'ютера для різних варіантів значень Δt . Ці оцінки дозволяють більш обґрунтовано висловити характер зміни зазначених критеріїв для різних варіантів значень Δt та використовувати їх для вибору компромісного варіанту.

Метод вибору. Вибір компромісного значення Δt реалізується в управляючій програмі моделювання (УПМ), що є однією з частин структурного визначення ІМ у вигляді кортежу [2, 7]:

$$IM = \{ \{ (AK_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}) \}, \text{ УПМ} \}.$$

УПМ в зазначеному визначенні ІМ забезпечує взаємодію активностей AK_{ij} ($i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}$) і виконує організуючі функції:

- зміну модельного часу t_0 на величину Δt ;
- зміну локальних координат t_i на τ_{ij} ;
- запуск на виконання алгоритмів AL_{ij} ;
- перевірку умов закінчення імітації, що

виражається у вигляді досягнення деякого значення модельного часу, або у вигляді виникнення деякої події.

Очевидно, що реалізація зазначених функцій залежить від значення Δt . Модельний час t_0 згідно методу постійного інтервалу, змінюється на величину Δt і набуває значення:

$$t_0 \in \{0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots\} = \{k \Delta t \mid k \in 0, 1, 2, 3, \dots\}.$$

Нехай $k = 1$. В БД виявляються ті значення t_{i1} , які належать інтервалу $(0, \Delta t)$, тобто інтервалу, який охоплює перехід від попереднього до наступного моменту модельного часу t_0 . Оскільки механізм зміни поточного значення j не вмикався, то $j = 1$ і розглядається чи належать значення t_{i1} інтервалу $(0, \Delta t)$.

Через I_1 позначається підмножина індексів компонентів K_i ($i \in \overline{1, n}$), для яких:

$$\forall i \in I_1; t_{i1} \in (0, \Delta t).$$

Це означає, що в інтервалі $(0, \Delta t)$, відбуваються події C_{i1} ($i \in I_1$) завершення виконання перших функціональних дій ΦD_{i1} ($i \in I_1$) в різних компонентах складної системи.

Як правило, значення t_{i1} ($i \in I_1$) різні і розподіляються певним чином в інтервалі $(0, \Delta t)$. Проте в ІМ передбачається, що всі ці моменти однакові та їх значення прирівнюються до значення правого кінця інтервалу, тобто $\forall i \in I_1, t_{i1} = \Delta t$.

Таким чином, допускається похибка моделювання F_1 , яка на першому інтервалі $(0, \Delta t)$, оцінюється величиною $F_1 = \sum_{i \in I_1} (\Delta t - t_{i1})$.

У момент модельного часу $t_0 = \Delta t$ вироблюється сигнал для УПМ на обробку інформації компонент K_i ($i \in I_1$).

Перш за все включається механізм зміни поточного значення індексу j так, що виконується умова: $\forall i \in I_1; j = j + 1$.

Потім реалізується ініціалізація активностей AK_{ij} ($i \in I_1$), що передбачає послідовне виконання алгоритмів AL_{ij} ($i \in I_1$).

Локальні координати t_i ($i \in I_1$) змінюються так, що моменти виникнення подій C_{ij} ($i \in I_1$) визначаються як $\forall i \in I_1, t_{ij} = \Delta t + \tau_{ij}$, а отримані значення вносяться в БД і запам'ятовуються. Перевіряється умова завершення імітації. Якщо вона не виконується, то процес моделювання продовжується. Значення k збільшується так, що $k = 2$.

У БД виявляються значення t_{ij} , які належать наступному інтервалу модельного часу $(\Delta t, 2\Delta t)$. Визначається множина індексів I_2 така, що

$$\forall i \in I_2, t_{ij} \in (\Delta t, 2\Delta t).$$

На інтервалі $(\Delta t, 2\Delta t)$, який розглядається, відбуваються події C_{ij} ($i \in I_2$), які завершують функціональні дії ΦD_{ij} ($i \in I_2$) в різних компонентах складної системи S .

Всі моменти t_{ij} ($i \in I_2$) в ІМ вважаються рівними значенню правого кінця інтервалу, що розглядається, тобто $\forall i \in I_2, t_{ij} = 2\Delta t$.

Припущення призводить до похибки, значення якої оцінюється величиною:

$$F_{12} = \sum_{i \in I_2} (2\Delta t - t_{ij}),$$

де t_{ij} розподіляються в межах інтервалу $(\Delta t, 2\Delta t)$.

В момент модельного часу $t_0 = 2\Delta t$ УПМ починає обробку інформації компонент K_i ($i \in I_2$).

Як і раніше, включається спочатку механізм зміни поточного значення індексу j так, що $\forall i \in I_2, j = j + 1$.

Ініціалізація активностей AK_{ij} ($i \in I_2$) зводиться до послідовного виконання алгоритмів AL_{ij} ($i \in I_2$).

Моменти виникнення подій C_{ij} ($i \in I_2$) визначаються як $\forall i \in I_2, t_{ij} = 2\Delta t + \tau_{ij}$.

Отримані значення t_{ij} ($i \in I_2$) вносяться до БД та запам'ятовуються.

Перевіряється умова завершення імітації i , якщо вона не виконується, то збільшується значення k , що означає перехід до наступного моменту модельного часу.

В загальному випадку, коли здійснюється перехід до моменту модельного часу $k\Delta t$, в БД виявляються значення t_{ij} які належать черговому інтервалу модельного часу $((k-1)\Delta t, k\Delta t)$.

Визначається множина індексів I_k така, що $\forall i \in I_k, t_{ij} \in ((k-1)\Delta t, k\Delta t)$.

На інтервалі $((k-1)\Delta t, k\Delta t)$ відбуваються події C_{ij} ($i \in I_k$). Як і раніше, всі моменти t_{ij} ($i \in I_k$), в яких відбуваються події C_{ij} ($i \in I_k$) прирівнюються до значення правого кінця розглянутого інтервалу, тобто $\forall i \in I_k, t_{ij} = k\Delta t$.

Визначається величина оцінки похибки на розглянутому інтервалі:

$$F_{1k} = \sum_{i \in I_k} (k\Delta t - t_{ij}).$$

УПМ в момент модельного часу $t_0 = k\Delta t$ починає обробку інформації, яка відноситься до реалізації функціональних дій в компонентах K_i ($i \in I_k$).

Змінюється поточне значення індексу j тих активностей, які ініціалізуються в розглянутому інтервалі так, що $\forall i \in I_k, j = j + 1$.

Ініціалізація активностей AK_{ij} ($i \in I_k$) передбачає послідовне виконання відповідних алгоритмів AL_{ij} ($i \in I_k$) і визначення моментів виникнення подій C_{ij} ($i \in I_k$):

$$\forall i \in I_k, t_{ij} = k\Delta t + \tau_{ij}.$$

У результаті БД поповнюється значеннями t_{ij} ($i \in I_k$).

Черговий раз перевіряється умова завершення імітації. Якщо вона не виконується, то процес моделювання продовжується. В іншому випадку, завершується.

Нехай в деякий момент модельного часу $t_0 = k'\Delta t$ утворюється така множина I , що $\forall i \in I_k, j = m_i$.

Оскільки всі індекси i , для яких зазначена умова виконується, повинні бути виключені із множини I , то отримуємо, що $I = \emptyset$. Це означає, що ініціалізовані всі активності AK_{ij} ($i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m_i}$), процес моделювання динаміки функціонування складної системи S завершений і він може бути відповідним чином представлений. На рис. 1 наведено приклад такого представлення для варіанта, коли $\Delta t = 8$.

Вихідні дані розглянутого прикладу такі:

$$\begin{aligned}
 S &= \{K_i | i \in \overline{1, 3}\}, \\
 K_1 &= \{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, 4}\}, \\
 \Phi D_{11} &< \Phi D_{12} < \Phi D_{13} < \Phi D_{14}, \\
 K_2 &= \{\Phi D_{2j} | j \in \overline{1, 3}\}, \\
 \Phi D_{21} &< \Phi D_{22} < \Phi D_{23}, \\
 K_3 &= \{\Phi D_{3j} | j \in \overline{1, 3}\}, \\
 \Phi D_{31} &< \Phi D_{32} < \Phi D_{33}, \\
 \tau_{11} &= 5, \tau_{12} = 8, \tau_{13} = 9, \tau_{14} = 7, \\
 \tau_{21} &= 10, \tau_{22} = 7, \tau_{23} = 9, \\
 \tau_{31} &= 8, \tau_{32} = 12, \tau_{33} = 10.
 \end{aligned}$$

Шляхом реалізації вказаних дій ІМ, покажімо для випадку, коли $\Delta t = 8$, динаміку функціонування складної системи у вигляді сукупності паралельних процесів функціонування складових компонент системи K_i ($i \in \overline{1, 3}$). При цьому кожний з процесів відображає виконання апроксимуючих функціональних дій ΦD_{ij} алгоритмів AL_{ij} . Це призводить до зміни стану компоненти у відповідних локальних часових координатах t_i .

Отримане на основі ІМ представлення динаміки функціонування складної системи дозволяє отримати повну оцінку похибки моделювання для заданого значення Δt :

$$F_1 = \sum_{k \in \overline{i, k'}} F_{1,k} = \sum_{k \in \overline{i, k'}} \sum_{i \in I_k} (k\Delta t - t_{ij}),$$

де $t_{ij} \in ((k-1)\Delta t, k\Delta t)$.

Як зазначалося, іншою оцінкою якості моделювання є витрати ресурсу часу комп'ютера на отримання зазначеного представлення динаміки. Непрямою оцінкою цих витрат з урахуванням групової обробки інформації різних компонент в момент модельного часу може бути число звернень до УПМ. Цю оцінку позначимо як F_2 .

Очевидно, що $F_2 = k'$, оскільки в момент модельного часу $t_0 = k'\Delta t$ забезпечується завершення ініціалізації всіх активностей AK_{ij} ($i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m_i}$).

Для розглянутого прикладу $F_1 = 21$, $F_2 = 4$. При цьому F_1 вимірюється в одиницях часу, а F_2 – безрозмірна величина, яка за умови реалізації вимірювання витрат ресурсу часу комп'ютера також може вимірюватися в одиницях часу.

В задачах вибору або прийняття рішення різні значення Δt є варіантами альтернатив Δt_l ($l \in L$), де l – індекс альтернативи, а L – загальна кількість альтернатив. Оцінки F_1 і F_2 є критеріями оптимальності або цільовими функціями, які необхідно мінімізувати в результаті вибору альтернативи [10–12].

Значення F_1 і F_2 , що отримані в результаті імітації для розглянутого прикладу і відповідають відповідним різним альтернативам Δt_l ($l \in \overline{1, L}$), наведені в табл. 1.

Аналіз результатів у табл. 1 з урахуванням мінімізації критеріїв F_1 і F_2 показує, що альтернативи $l = 3, 4$, для яких $F_2 = 5$, а $F_1 = 19$ і $F_1 = 25$ відповідно можуть не враховуватися в задачі вибору, оскільки є альтернатива $l = 2$, для якої

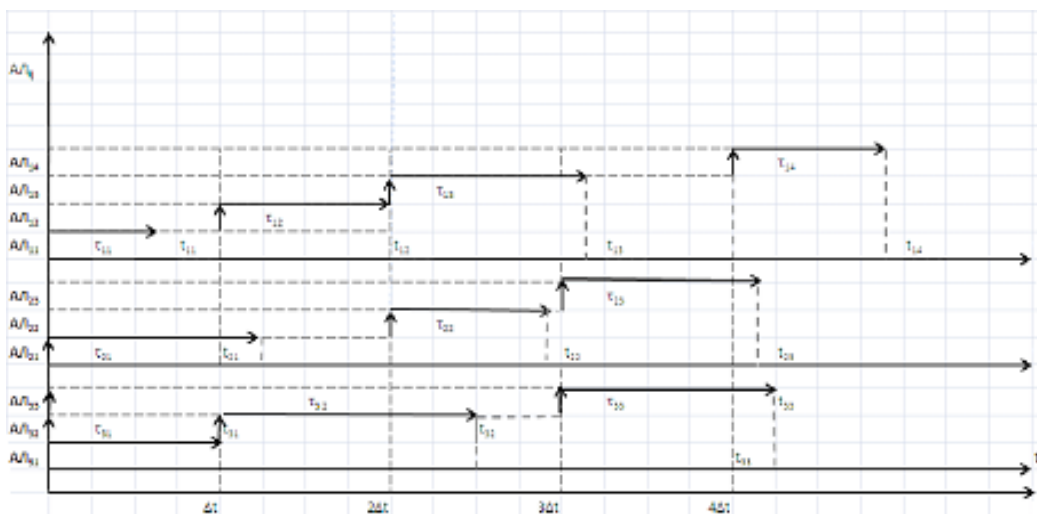


Рис. 1. Наочне представлення результатів ІМ динаміки функціонування системи $S = \{K_i | i \in \overline{1, 3}\}$

$F_2 = 5$, як і для $l = 3, 4$, але при цьому $F_1 = 11$, що менше ніж для $l = 3, 4$.

Таблиця 1 – Значення локальних критеріїв на множині альтернатив

l	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Δt_l	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
F_1	9	11	19	25	21	22	22	29	25	32	39
F_2	7	5	5	5	4	3	3	3	3	3	3

З цієї ж причини альтернативи $l = 8, 9, 10, 11$ для яких $F_2 = 3, F_1 = 29, 25, 32, 39$ відповідно, можуть не враховуватися при виборі, оскільки є альтернативи $l = 6, 7$ з тим самим значенням для F_3 , так як $F_1 = 22$. Крім цього, оскільки альтернативи $l = 6, 7$ рівнозначні, то для вибору може використовуватися одна з них, наприклад $l = 6$.

Таким чином, допустима множина альтернатив для рішення задачі вибору складають альтернативи $l = 1, 2, 5, 6$. Для визначення компромісної альтернативи на множині локальних критеріїв $\{F_1, F_2\}$ використовуються перетворення:

$$W_1(l) = \frac{F_1(l) - F_{1\min}}{F_{1\max} - F_{1\min}},$$

$$W_2(l) = \frac{F_2(l) - F_{2\min}}{F_{2\max} - F_{2\min}},$$

де $F_{1\min}, F_{2\min}, F_{1\max}, F_{2\max}$ – відповідно мінімальні і максимальні значення критеріїв F_1, F_2 , які мінімізуються на множині допустимих альтернатив $l = 1, 2, 5, 6$.

Розподіл альтернатив у двовірному просторі значень функцій W_1 і W_2 показано на рис. 2, на якому у вигляді темних кіл представляються ефективні альтернативи. Компромісна альтернатива визначається серед ефективних шляхом мінімізації узагальненого критерію:

$$W(l) = \sum_{r \in \overline{1, R}} \alpha_r W_r(l),$$

де $\forall r \in \overline{1, R}, \alpha_r \geq 0, \sum_{r \in \overline{1, R}} \alpha_r = 1$.

Значення $\alpha_r \geq 0$ ($r \in \overline{1, R}$) показують переваги особи, що приймає рішення, локальним критеріям оптимальності.

На рис. 2 стрілкою показується напрямок переміщення лінії рівня узагальненого критерію $W(l) = \alpha_1 W_1(l) + \alpha_2 W_2(l) = b$ при його мінімізації в разі, коли локальні критерії рівнозначні ($b \rightarrow \min$), коли локальні критерії рівноправні ($\alpha_1 = \alpha_2$).

У цьому випадку ефективна альтернатива $l = 2$ вибирається як компромісна. Інша ефективна альтернатива може бути обрана в якості компромісної, якщо змінити орієнтацію лінії рівня в просторі функцій W_1, W_2 шляхом змін значень α_1 і α_2 , які виражають важливість відповідних функцій для особи, що приймає рішення.

Висновки. Таким чином, проведено аналіз проблеми вибору величини інтервалу зміни модельного часу в методі фіксованого кроку, що визначає порядок обробки інформації комп'ютером при реалізації імітаційного моделювання процесу функціонування складної системи, яка складається багатьох паралельно працюючих компонент.

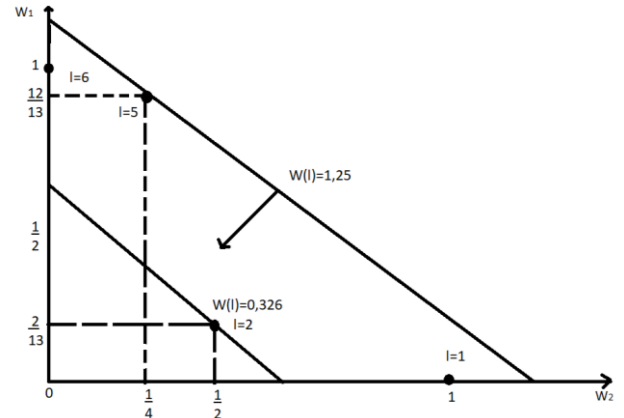


Рис. 2. Розподіл ефективних альтернатив і пошук серед них компромісної

Було показано, що існуючі рекомендації мають лише якісний характер.

У статті запропоновано метод вибору, який заснований на розрахунку кількісних оцінок значень двох критеріїв якості: точності та витрат ресурсу комп'ютеру для різних значень інтервалу зміни модельного часу. Ці оцінки дозволяють більш обґрунтовано показати характер зміни критеріїв, які розглядаються для різних варіантів значень інтервалу зміни модельного часу і використовувати їх для вибору компромісного варіанту.

Список літератури

1. Шеннон Р. *Имитационное моделирование систем – искусство и наука*. Москва: Мир, 1978. 352 с.
2. Максимей И. В. *Имитационное моделирование на ЭВМ*. Москва: Радио и связь, 1988. 232 с.
3. Литвинов В. В., Марьянович Т. П. *Методы построения имитационных систем*. Киев: Наукова думка. 120 с.
4. Гульятев О. К. *Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие*. Санкт-Петербург: Корона принт, 1999. 288 с.
5. Томашевський В. М., Жданова О. Г. *Имитационное моделирование в среде GPPS*. Москва: Бестселлер, 2003. 416 с.
6. Кисилева М. В. *Имитационное моделирование в среде AnyLogic: Учебно-методическое пособие*. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. 88 с.
7. Гамаюн І. П., Чередніченко О. Ю. *Моделювання систем: навчальний посібник для студентів спеціальностей «Програмна інженерія», «Комп'ютерні науки»*. Харків: Факт, 2015. 228 с.
8. Гамаюн И. П. *Имитационное моделирование процессов сборки. Электронное моделирование*. 2000, № 1. С. 100–106.
9. Гамаюн И. П. *Разработка имитационных моделей на основе сетей Петри: Учебное пособие*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. 143 с.
10. Гамаюн И. П. *Определение компромиссной альтернативы в одной задаче структурного синтеза. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков: НАКУ «ХАИ», Торнадо, 2001, № 10. С. 3–10.
11. Михалевич В. С., Волкович В. Л. *Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем*. Москва: Наука, 1982. 288 с.

12. Гамаюн И. П., Ямшанов И. С. Многокритериальная оптимизация на множестве технологических схем сборки. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2003, № 4. С. 27–30.

References (transliterated)

1. Shannon R. *Imitacionoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Systems Simulation - Art and Science]. Moscow, Mir Publ., 1978. 352 p.
2. Maxcimey I. V. *Imitacionoe modelirovanie na EVM* [Computer simulation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988. 232 p.
3. Litvinov V. V., Maraynovich T. P. *Metodu postroeniya imitacionnykh sistem* [Methods of constructing imitation systems]. Kiev, Naykova dymka Publ., 1991. 120 p.
4. Gyltyaev O. K. *Imitacionoe modelirovanie v srede Windows: prakticheskoe posobie* [Windows Simulation: A Practical Guide]. St. Petersburg, Koronaprint Publ., 1999. 288 p.
5. Tomashevski V. M., Jdanova O. G. *Imitacionoe modelirovanie v srede GPPS* [Simulation modeling in the GPPS environment]. Moscow: Bestseller Publ., 2003. 416 p.
6. Kicileyva M. V. *Imitacionoe modelirovanie v srede AnyLogic: Uchebno-metodicheskoe posobie* [Simulation modeling in the AnyLogic environment: Educational-methodological guide]. Ekaterinburg, UGTU – UPI Publ., 2009. 88 p.
7. Gamaun I. P., Cherednichenko O. Y. *Modeluyannyy sistem: navchalniy posibnik dlya studentiv specialnosti "Programma inzhneriy", "Kompyutni nauki"* [System model: a basic guide for students of specialties "Programming Engineering", "Computers of Science"]. Kharkiv: Fact Publ., 2015. 228 p.
8. Gamaun I. P. *Imitacionoe modelirovanie procesov sborki* [Simulation of assembly processes]. *Electronic modeling*. 2000, issue 4, pp. 100–106.
9. Gamaun I. P. *Razrabotka imitacionnykh modeley na osnove setey Petri: utchebnoe posobie* [Development of simulation models based on Petri nets: a tutorial]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2002. 143 p.
10. Gamaun I. P. *Opredelenie kompromisnoy alternativy v odnoy zadatke strukturnogo synteza* [Determination of a compromise alternative in one structural synthesis task]. *Opetchnologies*. Kharkiv, NAU "KhAI" Publ., 2001, issue 10, pp. 3–10.
11. Myhalevich V. S., Volkovich V. L. *Vychislitelnye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* [Computational methods of research and design of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 288 p.
12. Gamaun I. P., Ymshanov I. S. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya na mnozhestve tehnologicheskikh shem sborki* [Multicriteria optimization of technological assembly schemes]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2003, issue 4, pp. 27–30.

Надійшла (received) 05.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гамаюн Ігор Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2009-4658>; e-mail: ipgamaun@kpi.kharkov.ua

Ершова Світлана Іванівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: svetlana.ershova.2016@gmail.com

Гамаюн Ігор Петрович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0009-5527>; e-mail: ipgamaun@kpi.kharkov.ua

Ершова Светлана Ивановна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: svetlana.ershova.2016@gmail.com

Gamaun Igor Petrovich – doctor of technical sciences, professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», professor of the department of software engineering and management information technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2009-4658>; e-mail: ipgamaun@kpi.kharkov.ua

Yershova Svitlana Ivanivna – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Senior Lecturer in Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: svetlana.ershova.2016@gmail.com

A. M. KOPP, D. L. ORLOVSKYI

CAPTURING SOFTWARE REQUIREMENTS FOR BUSINESS PROCESS MODEL ANALYSIS AND IMPROVEMENT

This paper considers the problem of software requirements capturing for business process model evaluation and recommendations generation to suggest how detected modeling errors may be eliminated in order to improve business process model correctness. Existing software tools for business process model analysis are based on metrics and thresholds that allow assume presence of errors in business process models, but they are not capable to recommend structural changes required to eliminate detected modeling errors. Therefore, business process model analysis and improvement tasks become relevant, since early detection and elimination of possible errors presented in business process models may allow organizations avoid extra costs that may occur on any of the steps of business process lifecycle. Since business process models are shared organizational assets, it is also necessary to consider the capabilities of collaborative and concurrent usage of business process models by multiple stakeholders. Hence, the workflow of business process model analysis and improvement was analyzed and its key steps, which describe expected user and software behavior, were formalized using the IDEF0 functional model. Functional software requirements were captured in the form of user stories according to modern agile practices of software development. These user stories are based on features and drawbacks of existing software tools for business process model analysis. Captured user stories were formalized using the use case modeling. Non-functional software requirements were also captured; they include maintainability, readability, testability, understandability, integrability, and complexity requirements. Captured requirements can be used to design and develop business process model analysis and improvement software capable to provide recommendations to eliminate detected modeling errors.

Keywords: business process model, model analysis, modeling errors, software requirements, software tool.

A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ

ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

У даній роботі розглядається проблема визначення вимог до програмного забезпечення для аналізу моделей бізнес-процесів та формування рекомендацій щодо усунення виявлених помилок моделювання для підвищення коректності моделей бізнес-процесів. Існуючі програмні засоби аналізу моделей бізнес-процесів базуються на метриках та порогових значеннях, що дозволяють припустити про наявність помилок у моделях бізнес-процесів, проте не надають структурні зміни, необхідні для усунення виявлених помилок моделювання. Тому актуальною стає проблема аналізу та вдосконалення моделей бізнес-процесів, оскільки раннє виявлення та усунення можливих помилок, представлених у моделях бізнес-процесів, може дозволити організаціям уникнути зайвих витрат, які можуть виникнути на будь-якому з етапів життєвого циклу бізнес-процесів. Оскільки моделі бізнес-процесів є спільними організаційними ресурсами, також необхідно враховувати можливості спільного та одночасного використання моделей бізнес-процесів декількома зацікавленими сторонами. Отже, було проаналізовано робочий процес аналізу та вдосконалення моделей бізнес-процесів, а його основні етапи, що описують очікувану поведінку користувачів та програмного забезпечення, були формалізовані за допомогою функціональної моделі IDEF0. Функціональні вимоги до програмного забезпечення були відображені у вигляді користувацьких історій згідно із сучасними практиками гнучкої розробки програмного забезпечення. Дані користувацькі історії засновані на особливостях та недоліках існуючих програмних засобів для аналізу моделей бізнес-процесів. Визначені користувацькі історії були формалізовані за допомогою моделювання варіантів використання. Також були враховані нефункціональні вимоги до програмного забезпечення, які включають придатність до підтримки та тестування, читабельність, зрозумілість, інтегрованість та складність. Визначені вимоги можуть бути використані для проектування та розробки програмного забезпечення для аналізу та вдосконалення моделей бізнес-процесів, здатного пропонувати рекомендації з усунення виявлених помилок моделювання.

Ключові слова: модель бізнес-процесу, аналіз моделі, помилки моделювання, вимоги до програмного забезпечення, програмний засіб.

A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСКИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ДЛЯ АНАЛИЗА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В данной работе рассматривается проблема определения требований к программному обеспечению для анализа моделей бизнес-процессов и формирования рекомендаций по устранению выявленных ошибок моделирования и повышению корректности моделей бизнес-процессов. В основе существующих программных средств для анализа моделей бизнес-процессов лежат метрики и пороговые значения, которые позволяют предположить о наличии ошибок в моделях бизнес-процессов, но не предлагают структурные изменения, необходимые для устранения выявленных ошибок моделирования. Поэтому актуальной становится проблема анализа и совершенствования моделей бизнес-процессов, поскольку раннее выявление и устранение возможных ошибок, представленных в моделях бизнес-процессов, может позволить организациям избежать лишних расходов, которые могут возникнуть на любом из этапов жизненного цикла бизнес-процессов. Поскольку модели бизнес-процессов являются общими организационными ресурсами, также необходимо учитывать возможности совместного и одновременного использования моделей бизнес-процессов несколькими заинтересованными сторонами. Поэтому был проанализирован рабочий процесс анализа и совершенствования моделей бизнес-процессов, а его основные этапы, описывающие ожидаемое поведение пользователей и программного обеспечения, были формализованы при помощи функциональной модели IDEF0. Функциональные требования к программному обеспечению были отражены в виде пользовательских историй в соответствии с современными практиками гибкой разработки программного обеспечения. Данные пользовательские истории основаны на особенностях и недостатках существующих программных средств для анализа моделей бизнес-процессов. Определенные пользовательские истории были формализованы при помощи моделирования вариантов использования. Также были определены нефункциональные требования к программному обеспечению, которые включают пригодность к поддержке и тестированию, читабельность, понятность, интегрируемость и сложность. Определенные требования могут быть использованы для проектирования и разработки программного обеспечения для анализа и совершенствования моделей бизнес-процессов, способного предлагать рекомендации по устранению выявленных ошибок моделирования.

Ключевые слова: модель бизнес-процесса, анализ модели, ошибки моделирования, требования к программному обеспечению, программное средство.

Introduction. In the recent decades business process management (BPM) has become one of the most popular and commonly used disciplines, which combines together knowledge and experience from both management and IT (Information Technology) domains. Methods and tools of business process design, analysis, and automation are the baseline of BPM. A business process can be considered as the structured set of activities (or tasks) that takes different resources (materials, information, documents etc.) as input and produces products or services valuable for customers as output [1].

Since BPM combines expertise of managerial and IT disciplines, it has attracted a lot of attention because of its process management capabilities. These capabilities allow organizations to improve performance, reduce costs, and to shorten execution time of business processes. Business process modeling is the key technique of BPM. It is used to [2]:

- Document organizational activity (e.g. to provide process regulations for employees).
- Analyze organizational activity (e.g. to search for errors and measure performance).
- Improve described processes (e.g. by eliminating detected errors).

Hence, tasks of business process model analysis and improvement become relevant, since early detection and elimination of errors presented in business process models may allow organizations avoid extra costs that may occur on all the phases of business process lifecycle [3].

Research object includes the business process model analysis and improvement workflow.

Research subject includes software requirements for business process model analysis and improvement.

Research goal is to improve the IT used for business process model analysis and improvement by introducing the software requirements, which are based on the latest research in this field and are suitable for collaborative and concurrent usage of business process models by multiple stakeholders (involved business parties).

Related work. Business process models are special enterprise models that serve to reflect specific features of business process. Business process models describe the business process structure, which includes the set of all nodes (activities, events etc.) and arcs (sequence flows, data flows etc.) that belong to the business process graph of any complexity and topology. When modeling business processes, their topology should be considered in order to design as understandable models as possible, which reflect real scenarios of business processes. Also labels of nodes and arcs that belong to the business process graph, which display names of tasks and transitions, may be considered as well [4].

There are various kinds of business process models (e.g. activity models and behavioral models [5]) that allow describing business processes from different perspectives and that serve their own purposes.

According to the recent survey [6], BPMN (Business Process Model and Notation) is the most popular business process modeling notation, which is used by almost 64% respondents. Almost 18% of survey participants use EPC

(Event-driven Process Chain) notation that is also used to create behavioral models. As for activity modeling, IDEF0 and DFD (Data Flow Diagram) diagrams are used only by 4% of respondents.

Therefore, it is quite naturally that existing software solutions used for business process model analysis support BPMN or at least EPC (as extremely popular once in 90s and early 2000s) modeling notations.

Existing software tools are based on the metrics and corresponding thresholds in order to check the correctness of business process models. There are following software solutions:

- BPMN Quality. It is the stand-alone Java-based application for evaluation of BPMN models [7]. It contains the modules used to extract business process structure data from XML-like documents (BPMN uses interexchange file format based on XML syntax), to calculate metrics, and interpret obtained results by comparing metrics' values to threshold values. This software tool uses control flow complexity (CFC) metrics for evaluation of business process models [8].
- BPMN Quality Tool. It is the plug-in for BPMN modeling tool Business Process Visual Architect that is also developed using Java [9]. This plug-in provides calculation of process model metrics including the coefficient of network connectivity (CNC), CFC, and source code metrics [10].
- Plug-ins for ProM (process mining software tool) that provide calculation of density, connectivity, size, and other metrics for EPC models [11]. This tool only calculates metrics but the interpretation is user responsibility.
- BEBoP (understandaBility vErifier for Business Process models). It is another Java-based tool for BPMN models evaluation [12]. Unlike previous software tools, this is a web-based system, which may be integrated with other systems or may be extended. The analytical capabilities of this tool are based on process modeling guidelines [13].

Hence, all of the considered software tools are based on metrics and thresholds that allow assume presence of errors in business process models. But these software tools are not capable to recommend structural changes required to eliminate possible modeling errors.

Problem statement. The research problem includes requirements capturing in order to design the software for business process model evaluation and recommendations generation to suggest how detected modeling errors may be eliminated in order to improve business process model correctness. It is also necessary to consider the capabilities of collaborative and concurrent usage of business process models by multiple stakeholders.

Workflow analysis. Before functional requirements are captured, it is required to analyze the business process model analysis and improvement workflow.

Functional model (fig. 1) of this workflow has been designed using the IDEF0 notation.

It is shown that business process model analysis and improvement workflow includes the following steps:

- Model designer (business user) uploads a created business process model prepared using one of the available modeling notations (BPMN, EPC etc.).
- Uploaded business process models are processed by the software tool, as the result model metrics and detected errors are calculated and displayed.
- Required changes, based on modeling guidelines are generated by the software tool, are displayed for processed models in order to suggest the user how detected errors could be eliminated.

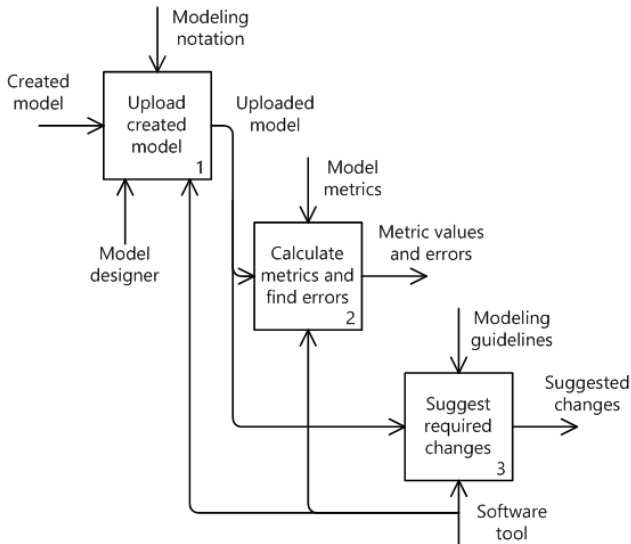


Fig. 1. Business process model analysis and improvement workflow

Captured user stories. Software requirements were captured with respect to the analyzed workflow. There are functional requirements presented as “user stories” widely used in agile methodologies [14]. Captured user stories are estimated using Fibonacci numbers: 1, 2, 3, 5, 8, and 13.

Users need to upload models for analysis (table 1).

Table 1 – Requirement to upload a new model

Title	FR01	Priority	8
User story	User	Model designer	
	Task	Upload a new model	
	Goal	Access a model for analysis	
Acceptance criteria	Context	User wants to upload a model	
	Action	User selects a file from disk	
	Outcomes	Model is appeared in a list of stored models	

Existing models need to be updated (table 2).

Table 2 – Requirement to update existing models

Title	FR02	Priority	8
User story	User	Model designer	
	Task	Update existing model	
	Goal	Track recent model changes	
Acceptance criteria	Context	User wants to update a model	
	Action	User selects stored model and picks new file from disk	
	Outcomes	File is updated for a stored model	

Also existing models need to be deleted (table 3).

Table 3 – Requirement to delete existing models

Title	FR03	Priority	3
User story	User	Model designer	
	Task	Delete existing model	
	Goal	Avoid outdated models	
Acceptance criteria	Context	User wants to delete a model	
	Action	User selects existing model to be deleted	
	Outcomes	Model is disappeared from a list of stored models	

Users should be able to perform analysis of existing models (table 4).

Table 4 – Requirement to analyze stored models

Title	FR04	Priority	13
User story	User	Model designer	
	Task	Analyze a model	
	Goal	Obtain model metrics and detect possible errors	
Acceptance criteria	Context	User wants to analyze a model	
	Action	User selects stored model to be analyzed	
	Outcomes	Metrics and detected errors are displayed and stored	

After a model is analyzed and metrics with possible detected errors are shown, users should be able to receive recommendations on how exactly detected errors could be eliminated (table 5).

Table 5 – Requirement to obtain recommendations for model improvement

Title	FR05	Priority	5
User story	User	Model designer	
	Task	Obtain recommendations for model improvement	
	Goal	Eliminate detected errors	
Acceptance criteria	Context	User wants to obtain recommendations	
	Action	User selects already analyzed model	
	Outcomes	Recommendations for model improvement are displayed	

Obtained analysis results should be downloadable as a stand-alone report (table 6).

Table 6 – Requirement to save model analysis report

Title	FR06	Priority	8
User story	User	Model designer	
	Task	Save model analysis report	
	Goal	Use analysis results any time	
Acceptance criteria	Context	User wants to save report	
	Action	User selects already analyzed model	
	Outcomes	Report file is downloaded	

Users should be able to login into a workspace that is personal for each user (table 7).

Table 7 – Requirement to login to a system

Title	FR07	Priority	5
User story	User	Model designer	
	Task	Login to a system	
	Goal	Work in a personal space	
Acceptance criteria	Context	User wants to login	
	Action	User inputs name and password	
	Outcomes	Workspace is opened or warning message is displayed	

Also users should be able to logout (table 8).

Table 8 – Requirement to logout of a system

Title	FR08	Priority	2
User story	User	Model designer	
	Task	Logout of a system	
	Goal	Prevent unauthorized access	
Acceptance criteria	Context	User wants to logout	
	Action	User clicks a logout button	
	Outcomes	Login form is displayed	

User stories considered above have been captured by analyzing features of existing software tools [7; 9; 11; 12]. It was taken into account that existing tools do not support multi-user access and do not suggest recommendations for business process model improvement.

As it is shown in tables above, captured user stories were estimated by their size (table 9).

Table 9 – Prioritized user stories

User story	Task	Priority
FR08	Logout of a system	2
FR03	Delete existing model	3
FR05	Obtain recommendations for model improvement	5
FR07	Login to a system	5
FR01	Upload a new model	8
FR02	Update existing model	8
FR06	Save model analysis report	8
FR04	Analyze a model	13

Use cases. Captured user stories demonstrate generic functional capabilities of business process model analysis and improvement software, which were formalized as use-cases outlined in fig. 2.

There use-cases of business process model analysis and improvement software are following:

- User logs in to a system.
- User uploads a business process model.
- User updates existing business process model.
- User deletes existing business process model.
- User calls for business process model analysis.
- User requests for recommendations to improve business process model correctness
- User downloads analysis report.
- User logouts of a system.

Non-functional requirements. Among the plethora of non-functional requirements we have captured:

- Maintainability. Any changes must be quick and cost efficient, so all classes and methods must be documented. Uncommented code units must not exceed 20% of all units.
- Readability. Developers need to follow declared indents and keep naming conventions to provide a consistent code style. Source code that violates established rules must not exceed 10% of KLOC (kilo lines of code).
- Testability. Maintainers should be able to detect and fix defects. Thus, unit tests must ensure 90% coverage.
- Understandability. User interface (UI) should be easy for perception: UI elements must not exceed 7 items per screen.
- Integrability. The system must accept BPMN 2.0 exchange file format to be integrated with almost any modern business process modeling suites. It must be possible to integrate with at least one of version-control systems (Subversion, Git etc.) to ensure collaborative work on process models.
- Complexity. It highly affects maintainability and readability. Hence, no class method may exceed 100 LOC (lines of code).

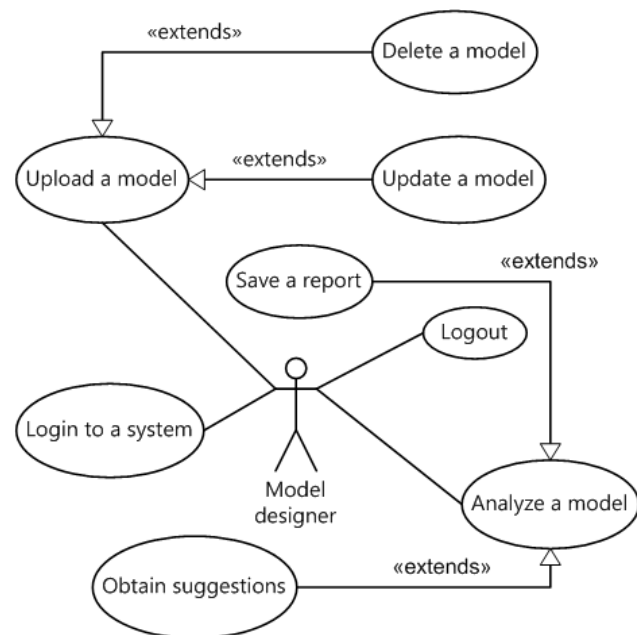


Fig. 2. Functional capabilities of the software tool

Defined non-functional requirements are measurable: integrability constraint is binary, while others are based on threshold values.

Conclusion. The problem of requirements capturing for the business process model analysis and improvement software has been considered. Captured requirements are based on features and lacks of existing software tools, but ensure recommendations generation in order to eliminate detected process modeling errors. While current software tools are mostly desktop or even plug-ins, when capturing requirement it was considered possibility of collaborative

and concurrent usage of multiple stakeholders (designers, business analysts etc.) via integration with version-control systems. A software build using elicited requirements may help organizations to reduce possible expenses caused by fault business process models.

Future research in this field includes software design and prototyping according to captured requirements.

References

1. Hammer M., Champy J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Zondervan, 2009. 272 p.
2. Van der Aalst W. M. P. *Business process management: a comprehensive survey*. Hindawi Publishing Corporation: ISRN Software Engineering, 2013. 37 p.
3. Mendling J., Sanchez-Gonzalez L., Garcia F., La Rosa M. Thresholds for error probability measures of business process models. *Journal of Systems and Software*. 2012. Vol. 5, no. 85. P. 1188–1197.
4. Dijkman R., Dumas M., Garcia-Banuelos L., Kaarik R. Aligning business process models. *IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference*. 2009. P. 45–53.
5. Kalpic B., Bernus P. Business process modeling through the knowledge management perspective. *Journal of Knowledge Management*. 2006. Vol. 10, no. 3. P. 40–56.
6. Harmon P. *The State of Business Process Management 2016*. BPTrends, 2016. 50 p.
7. Makni L. et al. A tool for evaluation the quality of business process models. *INFORMATIK 2010 Business Process and Service Science – Proceedings of ISSS and BPSC*. 2010. P. 230–242.
8. Kahloun F., Channouchi S. A. Quality criteria and metrics for business process models in higher education domain: case of a tracking of curriculum offers process. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 100. P. 1016–1023.
9. Sadowska M. An approach to assessing the quality of business process models expressed in BPMN. *E-Informatica Software Engineering Journal*. 2015. Vol. 9, no. 1. P. 57–77.
10. Mendling J. *Detection and prediction of errors in EPC business process models*. Wirtschaftsuniversität Wien. Vienna, 2007. 525 p.
11. Vanderfeesten I. et al. Quality metrics for business process models. *BPM and Workflow handbook*. 2007. Vol. 144. P. 179–190.
12. Corradini F. et al. A guidelines framework for understandable BPMN models. *Data & Knowledge Engineering*. 2018. Vol. 113. P. 129–154.
13. Mendling J. et al. Seven process modeling guidelines (7PMG). *Information and Software Technology*. 2010. Vol. 52. P. 127–136.
14. Rubin K. S. *Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process*. Addison-Wesley Professional, 2012. 452 p.

References (transliterated)

1. Hammer M., Champy J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Zondervan, 2009. 272 p.
2. Van der Aalst W. M. P. *Business process management: a comprehensive survey*. Hindawi Publishing Corporation: ISRN Software Engineering, 2013. 37 p.
3. Mendling J., Sanchez-Gonzalez L., Garcia F., La Rosa M. Thresholds for error probability measures of business process models. *Journal of Systems and Software*. 2012, vol. 5, no. 85, pp. 1188–1197.
4. Dijkman R., Dumas M., Garcia-Banuelos L., Kaarik R. Aligning business process models. *IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference*. 2009, pp. 45–53.
5. Kalpic B., Bernus P. Business process modeling through the knowledge management perspective. *Journal of Knowledge Management*. 2006, vol. 10, no. 3, pp. 40–56.
6. Harmon P. *The State of Business Process Management 2016*. BPTrends, 2016. 50 p.
7. Makni L. et al. A tool for evaluation the quality of business process models. *INFORMATIK 2010 Business Process and Service Science – Proceedings of ISSS and BPSC*. 2010, pp. 230–242.
8. Kahloun F., Channouchi S. A. Quality criteria and metrics for business process models in higher education domain: case of a tracking of curriculum offers process. *Procedia Computer Science*. 2016, vol. 100, pp. 1016–1023.
9. Sadowska M. An approach to assessing the quality of business process models expressed in BPMN. *E-Informatica Software Engineering Journal*. 2015, vol. 9, no. 1, pp. 57–77.
10. Mendling J. *Detection and prediction of errors in EPC business process models*. Wirtschaftsuniversität Wien. Vienna, 2007. 525 p.
11. Vanderfeesten I. et al. Quality metrics for business process models. *BPM and Workflow handbook*. 2007, vol. 144, pp. 179–190.
12. Corradini F. et al. A guidelines framework for understandable BPMN models. *Data & Knowledge Engineering*. 2018, vol. 113, pp. 129–154.
13. Mendling J. et al. Seven process modeling guidelines (7PMG). *Information and Software Technology*. 2010, vol. 52, pp. 127–136.
14. Rubin K. S. *Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process*. Addison-Wesley Professional, 2012. 452 p.

Received 05.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Копп Андрій Михайлович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Орловський Дмитро Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

Копп Андрей Михайлович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Орловский Дмитрий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

Kopp Andrii Mykhailovych – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Senior Lecturer of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Orlovskiy Dmytro Leonidovych – PhD in Technical Sciences, Docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

V. L. LISITSKY, A. I. SEMENCHENKO

ASSESSMENT OF THE STRATEGIC POTENTIAL OF AN INTELLECTUAL BUSINESS SYSTEM OPERATING IN A DYNAMIC EXTERNAL ENVIRONMENT

The paper discusses the issues of increasing the efficiency of the functioning of an intelligent business system by reducing its losses by creating an integrated set of models for assessing the level of its current strategic potential and the degree of achievement of its fixed target state. The object of the analysis is an intelligent business system of the IT industry that produces software products, the results of which depend on the well-established abilities of its personnel, who has effective intelligent information technologies. The task of assessing the strategic potential, determined by the totality of available resources (human, material, intellectual) that can be put into action, mobilized to achieve the target state of the enterprise, this calculation is based on estimates of the material and intellectual potential of the business system. We will build a complex of models for determining estimates of material and intellectual potential based on the significance and intensity of the influence of the strengths and weaknesses of the material, human, intellectual resources of the functional zones of the business system. Development of a subject technology for assessing the strategic potential of an intelligent business system, assessing the degree to which it reaches a fixed target state. Obtaining the results can serve as a theoretical basis for creating information technology for assessing the strategic potential of an enterprise in the IT industry.

Keywords: intelligent business system, assessment of strategic potential, target state of the enterprise, material and intellectual potential, hierarchy analysis method, functional areas of the business system.

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, А. І. СЕМЕНЧЕНКО

ОЦІНКА СТРАТЕГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ БІЗНЕС-СИСТЕМИ, ЩО ФУНКЦІОНУЄ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В роботі розглядається питання підвищення ефективності функціонування інтелектуальної бізнес-системи за рахунок зниження її збитків шляхом створення інтегрованого комплексу моделей оцінки рівня її поточного стратегічного потенціалу і ступеня досягнення її зафіксованого цільового стану. Об'єктом аналізу є інтелектуальна бізнес-система ІТ індустрії, яка виробляє програмну продукцію, результати діяльності якої залежать від усталених здібностей свого персоналу, що володіє ефективними інтелектуальними інформаційними технологіями. Завдання оцінки стратегічного потенціалу, що визначається сукупністю наявних ресурсів (людських, матеріальних, інтелектуальних), які можуть бути приведені в дію, мобілізовані для досягнення цільового стану підприємством, полягає в обчисленні його на основі оцінок матеріального і інтелектуального потенціалів бізнес-системи. Побудуємо комплекс моделей визначення оцінок матеріального і інтелектуального потенціалів на основі значимості і інтенсивностей впливу сильних і слабких сторін матеріальних, людських, інтелектуальних ресурсів функціональних зон бізнес-системи. Розробка предметна технологія оцінки стратегічного потенціалу інтелектуальної бізнес-системою, оцінки ступеня досягнення нею зафіксованого цільового стану. Отримання результату можуть слугувати теоретичною основою для створення інформаційної технології оцінки стратегічного потенціалу підприємства ІТ індустрії.

Ключові слова: інтелектуальна бізнес-система, оцінка стратегічного потенціалу, цільове стан підприємства, матеріальний і інтелектуальний потенціал, метод аналізу ієрархій, функціональні зони бізнес-системи.

В. Л. ЛИСИЦЬКИЙ, А. И. СЕМЕНЧЕНКО

ОЦЕНКА СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ БИЗНЕС-СИСТЕМЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧНОЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

В работе рассматриваются вопросы повышения эффективности функционирования интеллектуальной бизнес-системы за счет снижения её убытков путем создания интегрированного комплекса моделей оценки уровня её текущего стратегического потенциала и степени достижения её зафиксированного целевого состояния. Объектом анализа является интеллектуальная бизнес-система ИТ индустрии, производящая программную продукцию, результаты деятельности которой зависят от устоявшихся способностей своего персонала, обладающего эффективными интеллектуальными информационными технологиями. Задача оценки стратегического потенциала, определяемого совокупностью имеющихся ресурсов (человеческих, материальных, интеллектуальных), которые могут быть приведены в действие, мобилизованы для достижения целевого состояния предприятием, состоит в вычислении его на основе оценок материального и интеллектуального потенциалов бизнес-системы. Построим комплекс моделей определения оценок материального и интеллектуального потенциалов на основе значимостей и интенсивностей влияния сильных и слабых сторон материальных, человеческих, интеллектуальных ресурсов функциональных зон бизнес-системы. Разработка предметная технология оценки стратегического потенциала интеллектуальной бизнес-системой, оценки степени достижения ею зафиксированного целевого состояния. Получение результата могут служить теоретической основой для создания информационной технологии оценки стратегического потенциала предприятия ИТ индустрии.

Ключевые слова: интеллектуальная бизнес-система, оценка стратегического потенциала, целевое состояние предприятия, материальный и интеллектуальный потенциал, метод анализа иерархий, функциональные зоны бизнес-системы.

Introduction. At the present stage of the formation of the information society, there is a significant change in the structure of its productive forces, the relationship between their material and intellectual components. This is explained by the intensive appearance, along with material business systems, of a wide class of intelligent business systems. Existing production business systems are largely dependent on their production capital (material potential). This especially significantly affects their management methods, and methods for assessing their strategic potential. Intelligent business systems that produce

intelligent products are completely dependent on the mental abilities of their staff with the latest information technologies (intellectual potential). “Blind” application of methods for assessing the strategic potential of production business systems to the assessing the strategic potential of intelligent business systems may be ineffective. In this regard, it is urgent to develop effective methods for assessing the strategic potential of an intellectual business system (IBS), which operates in a dynamic external environment. The aim of the work is to increase the efficiency of IBS functioning by developing subject

technology for reliable assessment of the strategic potential of IBS, developing in the direction of a fixed target state [1–3].

Literature review. Literary sources and publications that are used in this article allow us to describe in detail the mathematical apparatus of solving a problem, assessing the strategic potential of an intellectual business system. This is the use of the hierarchy analysis method, strategic management techniques and others.

Formulation of the problem. In process management, an intelligent business system is understood as a set of intelligent business processes (IBP) (main, providing, as well as IBP management, development), which form a certain structure designed to actively achieve a fixed global goal with maximum efficiency [4]. IBS has the resources (human, material, intellectual) that determine its material and intellectual potentials. IBS, as a rule, is based on knowledge, contains a complex of software linguistic and logical-mathematical knowledge management tools for intellectual support of personnel activities, information and knowledge search in an interactive solution in a natural language [3–5]. The IBS structure is dynamic. It develops and changes under the influence of the features of the implemented IBS strategy, its internal complexity and changes in the external environment. It is assumed that IBS has a matrix structure in which the members of the project team are subordinate not only to the project manager, but also to the heads of those structural divisions in which they constantly work. IBS intellectual products are software for the automation of management accounting in trade, catering, and small and medium-sized businesses. The design and development of software is based on its life cycle model, which contains the following steps: analysis; design; development; testing; implementation; escort. It is generally accepted that its resources determine the potential of any enterprise. The strategic potential of IBS is understood as the totality of available resources (human, material, intellectual) that can be put into action, mobilized to achieve the global goal of IBS, determined by its mission. Typically, strategic potential is defined by a multitude of quantitative indicators. Taking into account the features of the IBS subject area, such as the quality and efficiency of decision making; unclear goals; the number of agents involved; chaos, fluctuations and quantization of the behavior of the internal and external environment; the multiplicity of mutually influencing factors; weakness structurefull, uniqueness, non-stereotyped situation, etc. It is difficult to indicate the degree of attainability of the target state based on all indicators [4, 6].

In this regard, an urgent task arises of assessing the strategic potential of the IBS with one quantitative indicator characterizing the degree of its achievement of the global goal.

Subject technology for assessing strategic potential. The levels and mutual influence of its material and intellectual potentials determine the strategic potential of IBS. Each of these potentials depends on the intensity of the influence of the strengths and weaknesses of the resources of the IBS functional zones (marketing; production; research work (innovation); personnel;

finance; management; external economic activity; other functional areas) on the degree to which the IBS target state is achieved. The intensity of the influence of the strong, weak sides of each functional area is determined by its significance and forecast probability and its manifestation on the time interval $[0; T]$ with duration T . It is assumed that $\underline{U} \leq U \leq \overline{U}$, where \underline{U} is the bottom limit, \overline{U} is the top limit of the probability of a side appearing during the movement of the IBS to the target position. The Importance of strengths and weaknesses is determined by its contribution to assessing the level of IBS potential. In the following, the material potential of IBS is understood as the totality of the available material and human resources of the IBS functional zones that can be activated, mobilized to achieve the global goal of IBS. Similarly, the intellectual potential of IBS is understood as the totality of the intellectual and human resources of the IBS functional areas that can be activated, mobilized to achieve the global goal of IBS. The level of Strategic Potential (SP) IBS is determined by dependence

$$SP = \varphi(MP, IP), \quad (1)$$

where MP is the level of material potential of IBS, IP is the level of intellectual potential of IBS. It is assumed that

$$MP_p \leq MP \leq MP_o, IP_p \leq IP \leq IP_o \quad (2)$$

where MP_o, IP_o is an optimistic assessment of the material and intellectual potentials of IBS and MP_p, IP_p is a pessimistic assessment of the material and intellectual potentials of IBS.

An optimistic assessment is manifested under the condition that the weaknesses of the resources of the functional zones are manifested with a probability equal to $U = \underline{U}$. A pessimistic assessment is manifested under the condition that the strengths of the resources of the functional zones are manifested with a probability equal to $U = \underline{U}$. In an optimistic assessment, strengths are manifested with probability equal to $U \in [\underline{U}, \overline{U}]$. In the case of a pessimistic assessment of potentials, weaknesses appear with the probability equal to $U \in [\underline{U}, \overline{U}]$. In reality, strengths and weaknesses are manifested with probability equal to $U \in [\underline{U}, \overline{U}]$. In this case, the material potential is determined by the formula

$$MP = \varphi_1(MP_o, MP_p), \quad (3)$$

and intellectual potential is determined by dependence

$$IP = \varphi_2(IP_o, IP_p), \quad (4)$$

In addition to U , the second factor affecting the IBS potential level is the significance of the i strengths and weaknesses of the resources of the IBS functional zones:

α_i is significance of the i -th strength of the material and human resources of the functional zones of IBS, $i = \overline{1, n_1}$, n_1 is the number of strengths;

β_i is significance of the i -th weaknesses of the material and human resources of the functional zones of IBS, $i = \overline{1, n_2}$, n_2 is the number of weaknesses;

γ_i is significance of the i -th strength of the material and human resources of the functional zones of IBS, $i = \overline{1, m_1}$, m_1 is the number of strengths;

θ_i is significance of the i -th weaknesses of the material and human resources of the functional zones of IBS, $i = \overline{1, m_2}$, m_2 is the number of weaknesses;

Taking into account the introduced designations, complex estimates are found:

- optimistic assessment of material potential MP_o is found [7, 8].
- pessimistic assessment of material potential MP_p [7] is

$$MP_p = 1 - \sum_{i=1}^{n_2} \beta_i (U_i - \underline{U}_i) / (\overline{U}_i - \underline{U}_i), \quad (6)$$

- optimistic intellectual potential IP_o [7] is.

$$IP_o = \sum_{i=1}^{m_1} \gamma_i (U_i - \underline{U}_i) / (\overline{U}_i - \underline{U}_i), \quad (7)$$

- pessimistic intellectual potential IP_p [7] is

$$IP_p = \sum_{i=1}^{m_2} \theta_i (U_i - \underline{U}_i) / (\overline{U}_i - \underline{U}_i). \quad (8)$$

Considering the additive nature of dependences (5–8), in determining PM and IP according to (3, 4), the geometric mean value MP_o and MP_p , IP_o and IP_p is used.

$$MP = (MP_o \cdot MP_p)^{1/2}, \quad IP = (IP_o \cdot IP_p)^{1/2} \quad (9)$$

Assessment of strategic potential is defined as the geometric mean value of PM and IP .

$$SP = (MP \cdot IP)^{1/2} \quad (10)$$

When defining values $\alpha_i, i = \overline{1, n_1}$, $\beta_i, i = \overline{1, n_2}$, $\gamma_i, i = \overline{1, m_1}$, $\theta_i, i = \overline{1, m_2}$, it should be mind that the functioning of IBS in the process of moving to the target state is determined by the multidimensional nature of business processes, their interconnection, dynamics, the multiplicity of participating agents, randomness, poor structure, etc. This leads to the emergence of new discrete structures with a new quality and influence on the process of achieving a global goal. It is advisable to use the method of analysis of hierarchies for study the influence of strengths and weaknesses on the achievement of the target state [9]. The basis of AHP is a hierarchy, which is a system of levels, each of which consists of elements and factors. The task in the language of hierarchy is to determine the intensity of the influence of lower-level elements on the focus of the problem. In an optimistic assessment of potentials, the focus of the problem is to increase the degree of achievement of the global goal. In a pessimistic assessment of potentials, the focus of the problem is to reduce the degree of achievement of the global goal. Fig. 1 shows the hierarchy for determining significance of $\alpha_i, i = \overline{1, n_1}$ and $\gamma_i, i = \overline{1, m_1}$.

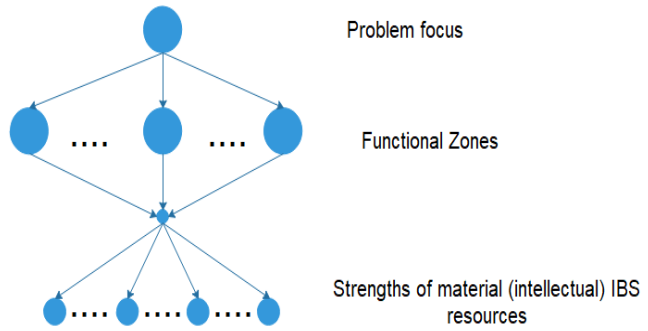


Fig. 1. Hierarchy for an optimistic assessment of the material (intellectual) potentials of IBS

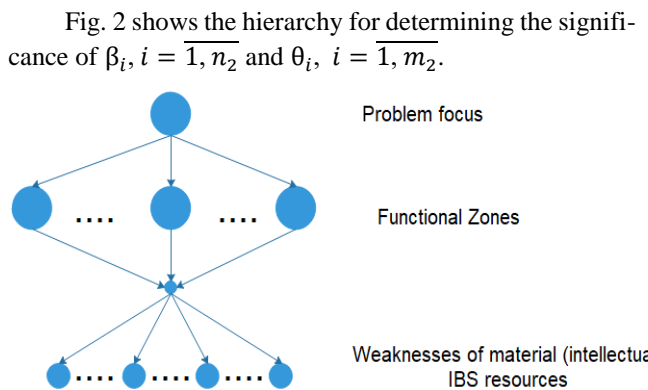


Fig. 2. Hierarchy for pessimistic assessment of material (intellectual) potentials of IBS

To implement the procedure for determining $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \theta_i$ a group of experts is created from numbers experienced IBS specialists who fill out questionnaires for the corresponding elements of the hierarchy (fig. 1, fig. 2). On the grounds of the completed questionnaires, a generalized matrix of pairwise comparisons is formed. Based on this matrix, local and global priorities of the elements of the lower and middle levels of hierarchies are determined. The global priorities of the elements of the lower level of hierarchies (fig. 1, fig. 2) determine their significance. The expert method determines the predicted values of $U, \underline{U}, \overline{U}$ for each strong and weak side [8, 10].

The results obtained make it possible to determine MP_o, MP_p, IP_o, IP_p , using dependencies (5–8), then using dependence (9) to determine MP and IP . Based on dependencies (10), the strategic potential of IBS is estimated.

As a result of the described technology, the value SP of the strategic potential of an intelligent business system is received. Fig. 3 shows the geometric interpretation of the SP , as the length of the side of the squares, with the area $M = MP \cdot IP$ [11, 12].

The use of an expert procedure using the technology of the hierarchy analysis method to evaluate the significance of the strengths and weaknesses of the material, human, and intellectual resources of the functional areas of the business system is supposed to be operated by the expert with qualitative concepts (more, much more, etc.) [12, 13].

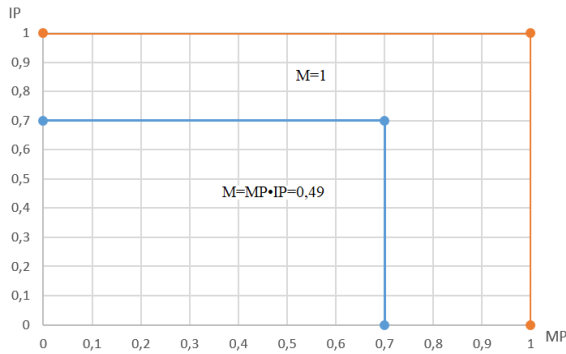


Fig. 3. Geometric interpretation of the strategic potential of an intelligent business system

At the same time, the real reasoning of experts based on natural language cannot be described within the framework of traditional mathematical formalisms. Therefore, when assessing the degree of achievement of the target state by an enterprise, it is advisable to use fuzzy sets. M is considered as a logical variable with the core $[0.49, 1]$. The function of membership $\mu(M)$ of the "masses" in the set H_o , providing the necessary degree h_o of achievement by the enterprise of the goal, is trapezoidal (fig. 4), where $[AC]$ is the core of $\mu(M)$. $M_o = \{M: h_o \leq \mu(M) \leq U\}$.

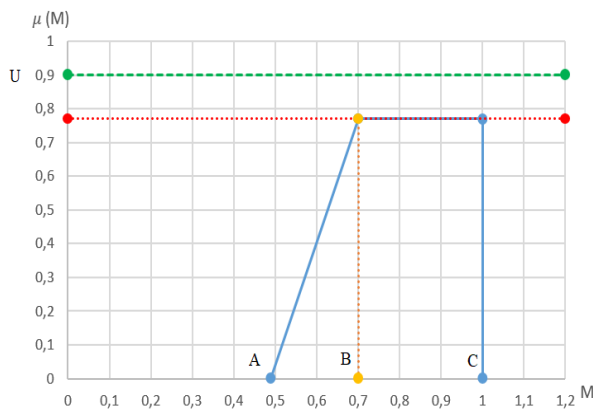


Fig. 4. Membership function parameters

The formula for $\mu(M)$ has the form

$$\mu(M) = \begin{cases} 0, & M < A, \\ h \cdot \frac{SP - A}{B - A}, & A \leq M \leq B, \\ h, & B \leq M \leq C. \end{cases} \quad (11)$$

In the case under consideration, $A = 0.49$, $C = 1$. Value $B = 0.7$, the value of U is chosen equal to 0.9 , $h_o \leq h \leq U$.

The described sequence of actions defines the subject technology for assessing the strategic potential of IBS, which contains the following steps:

- Collection of qualitative and quantitative information about the internal environment of IBS, the material and intellectual resources of its functional zones;
- Identification of the strengths and weaknesses of the material resources of the IBS functional zones;
- Identification of strengths and weaknesses of the intellectual resources of the IBS functional zones;

- Determination of forecast probabilities of manifestation of $U, \underline{U}, \bar{U}$ of all IBS strengths and weaknesses;

- Expert procedure for the formation of matrices of pairwise comparisons;

- Determination of the significance $\alpha_i, i = \overline{1, n_1}, \beta_i, i = \overline{1, n_2}, \gamma_i, i = \overline{1, m_1}, \theta_i, i = \overline{1, m_2}$ of the strengths and weaknesses of IBS;

- Assessment of the material potential of IBS;

- Assessment of the intellectual potential of IBS;

- Assessing the Strategic Potential of IBS.

As a result of the implementation of the developed subject technology, the SP value is obtained. Let the threshold h is specified that defines the minimum acceptable degree of achieving a global goal. If $SP \leq h$, then it is logical to expect that the target IBS state will not be achieved [14].

Conclusions. The proposed subject technology allows us to determine a comprehensive assessment of the strategic potential of IBS, striving to achieve a given target state, to assess the ability to achieve IBS. The proposed subject technology can serve as the basis for creating information technology for assessing the strategic potential of IBS.

References

1. Макаров В. Л., Варшавский А. Е. *Инновационный менеджмент в России: вопросы стратегического управления и научно-технической безопасности*. Москва: Наука, 2004. 889 с.
2. Савельева Н. А. *Стратегический менеджмент*. Ростов на Дону: Феникс, 2012. 382 с.
3. Казанцев А. К. *Основы производственного менеджмента*. Москва: ИНФРА-М, 2012. 347 с.
4. Гернет Н. Д., Лисицкий В. Л. Целеполагание в бизнес-системах. *Математика. Компьютер. Образование. Тезисы XXV международной конференции. Серия 25*. Москва, Ижевск: R&G Dynamics Москва. 2018. С. 288.
5. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. *Интеллектуальные системы и технологии*. Москва: Академия, 2013. 320 с.
6. Лисицкий Василий, Гернет Надежда. *Прогнозирование и планирование переходных процессов в организациях*. Saarbrucken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. 60 с.
7. Лисицкий В. Л., Гернет Н. Д. Количественная оценка стратегической позиции организации, функционирующей в условиях динамичной внешней среды. *Анализ и моделирование экологических и социальных процессов. Математика. Компьютер. Образование: Сборник научных трудов*. Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. Выпуск 21, № 2. С. 55-61.
8. Остроух А. В. *Интеллектуальные системы*. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. 110 с.
9. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
10. Стеллман Э., Грин Д. *Постигая Agile. Ценности, принципы, методологии*. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2017. 448 с.
11. Суркова Н. Е., Остроух А. В., Еремина Т. И. *Профессиональные информационные системы и базы данных: методические указания к лабораторным работам*. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. 49 с. ISBN 978-5-906314-23-9. DOI: 10.12731/asu.madi.ru/PISDB.2015.49. URL: <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel16M490.pdf> (дата звернення: 02.11.2020).
12. Кэмпбелл Д., Стоунхаус Д., Хьюстон Б. *Стратегический менеджмент*. Москва: Проспект, 2003. 336 с.
13. Fleisher Craig S., Bensoussan Babette E. *Business and Competitive Analysis. Effective Application of New and Classic Methods*. New Jersey, 2015. 624 p.

14. *Strategic Analysis: Understanding a Firm's Competitive Environment*. The Open Courses Library. 49 p. ISBN-10: 1703596153.

Literature (References)

- Makarov V. L., Warsaw A. E. *Innovacionnyj menedzhment v Rossii: voprosy strategicheskogo upravleniya i nauchno-tekhnicheskoy bezopasnosti* [Innovation management in Russia: issues of strategic management and scientific and technical security]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 889 p.
- Savelyeva N. A. *Strategicheskij menedzhment* [Strategic management]. Rostov on Don: Phoenix Publ., 2012 – 382 p.
- Kazantsev A. K. *Osnovy proizvodstvennogo menedzhmenta* [Fundamentals of production management]. Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 347 p.
- Gernet N. D., Lisitsky V. L. *Celepolaganie v biznes-sistemah* [Goal setting in business systems]. *Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie. Tezisy XXV mezhdunarodnoj konferencii. Seriya 25. Izhevsk* [Mathematics. A computer. Education. Abstracts of the XXV International Conference. Series 25]. Moscow, Izhevsk, R&G Dynamics Moskva Publ., 2018, p. 288.
- Sovetov B. Ya., Tsekhanovsky V. V., Chertovskoy V. D. *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii* [Intelligent systems and technologies]. Moscow, Academy Publ., 2013. 320 p.
- Lisitsky Vasily, Gernet Nadezhda. *Prognozirovaniye i planirovaniye perekhodnykh processov v organizatsiyah* [Forecasting and planning of transient processes in organizations]. Saarbrücken, LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. 60 p.
- Lisitsky V. L., Gernet N. D. *Kolichestvennaya ocenka strategicheskoy pozitsii organizatsii, funkcioniruyushchej v usloviyah dinamichnoy vneshney sredy* [A quantitative assessment of the strategic position of an organization operating in a dynamic environment]. *Analiz i modelirovaniye ekologicheskikh i social'nykh processov. Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie: Sbornik nauchnykh trudov* [Analysis and modeling of environmental and social processes. Mathematics. A computer. Education: Collection of scientific papers]. Moscow, Izhevsk, NIC "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika" Publ., 2014, issue 21, no. 2, pp. 55–61.
- Ostroukh A. V. *Intellektual'nye sistemy* [Intelligent systems]. – Krasnoyarsk, Nauchno-innovacionnyj centr Publ., 2015. 110 p.
- Saati T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 278 p.
- Stellman E., Grin D. *Head First Agile: A Brain-Friendly Guide to Agile Principles, Ideas, and Real-World Practice*. O'Reilly Media, 2017. 586 p. (Russ. ed.: Stellman E., Grin D. *Postigaya Agile. Cennosti, principy, metodologii*. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 2015. 448 p.).
- Surkova N.E. *Professional information systems and databases: guidelines for laboratory work* / N.E. Surkova, A.V. Ostroukh, T.I. Eremin. Krasnoyarsk, Nauchno-innovacionnyj centr Publ., 2015. 49 p. ISBN 978-5-906314-23-9. DOI: 10.12731/asu.madi.ru/PISDB.2015.49. Available at: <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel16M490.pdf> (accessed 02.11.2020).
- Campbell D., Stonehouse G., Houston B. *Business Strategy: An Introduction*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2002. 502 p. (Russ. ed.: Campbell D., Stonehouse G., Houston B. *Strategicheskij menedzhment*. Moscow, Prospekt Publ., 2003. 336 p.).
- Fleisher Craig S., Bensoussan Babette E. *Business and Competitive Analysis. Effective Application of New and Classic Methods*. New Jersey, 2015. 624 p.
- Strategic Analysis: Understanding a Firm's Competitive Environment*. The Open Courses Library. 49 p. ISBN-10: 1703596153..

Received 04.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лисицький Василь Лаврентійович – 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/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com.

Семенченко Арсеній Ігоревич – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-7369>; e-mail: 333arseniy333@gmail.com.

Лисицький Василь Лаврентійович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры Программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com.

Семенченко Арсеній Ігоревич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-7369>; e-mail: 333arseniy333@gmail.com.

Lisitsky Vasily Lavrentievich – candidate of technical sciences, docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Professor of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; . Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: naukaint2016@gmail.com.

Semenchenko Arseniy Igorevich – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», student; c. Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-7369>; e-mail: 333arseniy333@gmail.com.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

UDC 681.518:658.519

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.06

V. Y. SOKOL, P. Y. SAPRONOV, M. O. BILOVA

USING CLOUD PLATFORMS TO BUILD DISTRIBUTED LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS

Distributed systems have problems with downtime, data loss during malfunctions, scalability and efficient use of computing resources. At the same time in the learning and training process, the use of a distributed system has the advantage of data processing: storage of information about students, construction of training courses, verification of passed material, etc. The problems of scaling and efficient use of resources in distributed learning management systems are investigated in this research. Cloud platforms for hosting the system, such as Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform and DigitalOcean are reviewed. Problems and features of a scalability in cloud computing are discussed. Methods, scaling and load balancing algorithms for the efficient use of computing resources are proposed. According to the list of advantages, the DigitalOcean platform was selected for the investigation. DigitalOcean provides cloud servers that can be used for quick creation of the new virtual machines for the projects. These servers allow to fully control the web hosting environment at the same time that the user pays only for the resources used. The main goal of DigitalOcean is to use a solid-state drive (SSD) to create a user-friendly platform that will allow clients to migrate projects to and from the cloud, increasing productivity with high speed and efficiency. As a result of analyzing information on existing technologies, approaches and methods for using cloud platforms in distributed systems, they have been applied to develop a solution to reduce downtime for a distributed adaptive Learning Management System (LMS). It is concluded that the use of cloud platforms for the construction of distributed LMS a practice that allows to use only the required amount of computing capacity. It is proven, that the implementation of the proposed solution into the work of adaptive LMS will improve its efficiency by reducing the time of the content delivering.

Keywords: cloud platforms, distributed systems, cloud computing, scaling, load balancing, virtualization, containerization.

V. Є. СОКОЛ, П. Ю. САПРОНОВ, М. О. БЛОВА

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ПОБУДОВИ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАВЧАННЯМ

Розподілені системи мають проблеми з простим, втратою даних під час несправностей, масштабованістю та ефективним використанням обчислювальних ресурсів. Водночас у процесі навчання та тренінгу використання розподіленої системи має перевагу обробки даних: зберігання інформації про студентів, побудова навчальних курсів, перевірка зданого матеріалу тощо. У даній роботі досліджено проблеми масштабування та ефективного використання ресурсів в розподілених системах управління навчанням. Розглянуто хмарні платформи для розміщення системи, такі як Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform та DigitalOcean. Розглянуто проблеми та особливості масштабованості хмарних обчислень. Запропоновано методи, алгоритми масштабування та балансування навантаження для ефективного використання обчислювальних ресурсів. Відповідно до переліку переваг, для дослідження було обрано платформу DigitalOcean. DigitalOcean надає хмарні сервери, які можна використовувати для швидкого створення нових віртуальних машин для проектів. Ці сервери дозволяють повністю контролювати середовище веб-хостингу, при цьому користувач платить лише за використані ресурси. Основною метою DigitalOcean є використання твердотільного накопичувача (SSD) для створення зручної платформи, яка дозволить клієнтам перемішувати проекти в хмару та з неї, підвищуючи продуктивність з високою швидкістю та ефективністю. В результаті аналізу інформації про існуючі технології, підходи та методи використання хмарних платформ у розподілених системах було розроблено рішення щодо скорочення простоїв розподіленої адаптивної системи управління навчанням (LMS). Зроблено висновок про те, що використання хмарних платформ для побудови розподілених LMS – це практика, яка дозволяє використовувати лише необхідну кількість обчислювальних потужностей. Доведено, що впровадження запропонованого рішення в роботу адаптивної LMS підвищить її ефективність за рахунок скорочення часу доставки контенту.

Ключові слова: хмарні платформи, розподілені системи, хмарні обчислення, масштабування, балансування навантаження, віртуалізація, контейнеризація.

V. E. SOKOL, P. YU. SAPRONOV, M. A. BELOVA

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАЧНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ОБУЧЕНИЕМ

Распределенные системы имеют проблемы с простым, потерей данных при неисправностях, масштабируемостью и эффективным использованием вычислительных ресурсов. В то же время в процессе обучения и тренинга использование распределенной системы имеет преимущества обработки данных: хранение информации о студентах, построение учебных курсов, проверка сданного материала и тому подобное. В данной работе исследованы проблемы масштабирования и использования ресурсов в распределенных системах управления обучением. Рассмотрены облачные платформы для размещения системы, такие как Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform и DigitalOcean. Рассмотрены проблемы и особенности масштабируемости облачных вычислений. Предложены методы, алгоритмы масштабирования и балансировки нагрузки для эффективного использования вычислительных ресурсов. В соответствии с перечнем преимуществ, для исследования была выбрана платформа DigitalOcean. DigitalOcean предоставляет облачные серверы, которые можно

© V. Y. Sokol, P. Y. Sapronov, M. O. Bilova, 2020

использовать для быстрого создания новых виртуальных машин для проектов. Эти сервера позволяют полностью контролировать среду веб-хостинга, при этом пользователь платит только за использованные ресурсы. Основной целью DigitalOcean является использование твердотельного накопителя (SSD) для создания удобной платформы, которая позволит клиентам перемещать проекты в облако и из него, повышая производительность с высокой скоростью и эффективностью. В результате анализа информации о существующих технологиях, подходах и методах использования облачных платформ в распределенных системах было разработано решение по сокращению простоев распределенной адаптивной системы управления обучением (LMS). Сделан вывод о том, что использование облачных платформ для построения распределенных LMS – это практика, которая позволяет использовать только необходимое количество вычислительных мощностей. Доказано, что внедрение предложенного решения в работу адаптивной LMS повысит ее эффективность за счет сокращения времени доставки контента.

Ключевые слова: облачные платформы, распределенные системы, облачные вычисления, масштабирование, балансировка нагрузки, виртуализация, контейнеризация.

Introduction. The emergence of distributed systems in the field of IT technology was because one computer could not process all the information that comes every day with the development of technology.

However, distributed systems still have problems with downtime, loss of important data during malfunctions, scalability and the most efficient use of computing resources. Over time, platforms have emerged to help solve this problem by providing cloud computing services. Cloud technologies (or cloud computing) are distributed digital data processing technologies that provide computer resources to the Internet user as an online service.

For the training system, the use of a distributed system has the advantage of data processing: storage of information about students, construction of training courses, verification of passed material, etc. When using cloud computing in such systems, mobility is an advantage. Therefore, a person can access training materials, courses, or test their knowledge from anywhere on the planet with Internet access and the device they need.

Learning management systems have become an integral part of the e-learning content development process, especially if there are many trainers and few trainees in the school or not, so one of these systems needs to be used to facilitate the tasks and refine the learning process.

Taking into account integrated knowledge-based methodological framework for staff-training in IT-companies [1; 2], the purpose of this work is to explore the technologies, approaches, and methods used in cloud platforms. Develop a solution to reduce downtime, scalability, and use only the required computing resources at any given time that can be deployed in distributed adaptive Learning Management System (LMS) [3].

Existing platform and technologies overview.

Overview of cloud platforms. The hardware and operating environment of a server in an Internet-based datacenter. The system software components (OS, virtual machine monitor, etc.) are called the “cloud stack” [2].

When using cloud platforms by clients, only the organization of the workplace (computer/laptop/tablet) is required, regardless of the location. The only condition is the availability of Internet access. The client (user of the cloud platform) is only responsible for the administration of its applications and software.

Amazon Web Services is a subsidiary of Amazon.com, which provides a cloud-based leasing platform to individuals, companies, and governments on a paid subscription basis. The technology allows subscribers to have a complete virtual cluster of computers, which is always accessible via the Internet.

Microsoft Azure is a cloud platform and infrastructure of Microsoft Corporation designed for cloud computing

developers and designed to streamline the process of creating online applications. A close competitor to AWS with an extremely capable cloud infrastructure. The Azure platform is also working with data centers.

Google Cloud Platform is Google's suite of cloud services that run on the same infrastructure that Google uses for its end-user products, such as Google Search and YouTube. Google later entered the cloud market and has no enterprise focus to help attract corporate clients. But his technical knowledge is deep, and his leading capabilities in deep learning and artificial intelligence, machine learning, and data analytics are significant strengths.

DigitalOcean is a US-based hosting company focused on helping developers launch more applications faster and easier. DigitalOcean provides cloud servers that developers can use to quickly create new virtual machines for their projects. They allow you to fully control the web hosting environment at the same time that the user pays only for the resources used. DigitalOcean's ultimate goal is to use a solid-state drive (SSD) to create a user-friendly platform that will allow their clients to migrate projects to and from the cloud, increasing productivity with high speed and efficiency [3].

Scalability in cloud computing. Scalability is the unique feature of cloud computing where dynamic provisioning of the resources is being done by the clients themselves with in the real time slice. Vertical scalability is the ability to increase the capacity of existing single hardware or software by adding more resources to the same server or hardware. Horizontal cloud scalability is the ability of the system or resources to connect multiple hardware or software entities, such as servers or networks so that they work as a one logical unit [4].

Load balancing. Load balancing is a method that has helped networks and resources, to provide maximum throughput with minimal response time [5].

In the static load balancing method, the performance of nodes is determined at the beginning of execution. Then, depending on their performance, the workload is distributed at the outset by the master node. The slave process calculates its distributed work and transmits its result to the master. The task is always performed on the node to which it is assigned.

Dynamic load balancing differs from static algorithms in that the workload is distributed between nodes at runtime. The wizard assigns new processes to subordinates based on the newly collected information. Unlike static algorithms, dynamic algorithms distribute processes dynamically when one of the processors becomes under load.

Virtualization. The creation of isolated environments within a single physical device. Each environment looks

like a separate computer with its characteristics, such as memory, processor and so on. This environment is called a set of logical resources [8].

Containerization. An alternative to full machine virtualization, which involves encapsulating the program into a container with its operating environment. This provides many benefits of downloading the application to a virtual machine since the application can be run on any physical machine without having to worry about dependencies.

Proposed approach. Choosing a cloud platform. Among all cloud platforms considered for use in a distributed system, DigitalOcean was selected. This platform has several significant advantages over other platforms:

- uptime 99.99 %;
- convenient tariff plan for the use of resources – payment only for what they used;
- IaaS is a provider of computing resources, so it is possible to adjust the distribution of resources according to needs [9];
- the ability to get computing resources quickly by deploying the required number of virtual machines or “drops”;
- the use of solid-state SSDs, which raises the speed of cloud computing on the platform;
- use of KVM (Kernel-based Virtual Machine) hypervisor [10, 11].

Scaling the system. When reviewing scaling methods for a distributed system, two main ones were selected – horizontal and automatic, and manual as a secondary.

The horizontal method is best suited for running LMS in the cloud since it is easier to create new virtual machines on the platform during high load and transfer to them the load that arises from systems upon request. If you take the

vertical method, you need to create a new virtual machine of larger size and transfer all the data to it and deploy it in the cloud. This means that the system may not be available for some time, so users will not be able to work with it [12].

The second main method is automatic. It will allow you to create new computing units to distribute the increased system load in the cloud.

We will also use the manual method as an auxiliary. After all, if the system administrator knows that the load will increase, then he can add new virtual machines himself or remove if some of them are no longer in use.

Load balancing in the system. Throttled load balancing method was chosen for system load balancing (fig. 1).

The load balancer (LB) maintains a table of virtual machine indexes, as well as their states (Available or Busy). The client/server first requests the data center to find a suitable virtual machine (VM) to perform the recommended task. The data center requests a LB to distribute the virtual machine. The LB scans the index table from above until the first available virtual machine is found or the index table is completely scanned.

If a virtual machine is found, the data center passes the request to the virtual machine identified by the identifier. Also, the data center confirms the load balancing of the new distribution, and the data center appropriately revises the index table. When processing a client request, if the corresponding VM is not found, the LB returns “-1” to the data center. The center request is processed by the data center.

This choice is due to the following factors use only the required computing resources, simple implementation and speed of execution.

At the moment, this algorithm is optimal for our system. But it should be noted that in the future, with

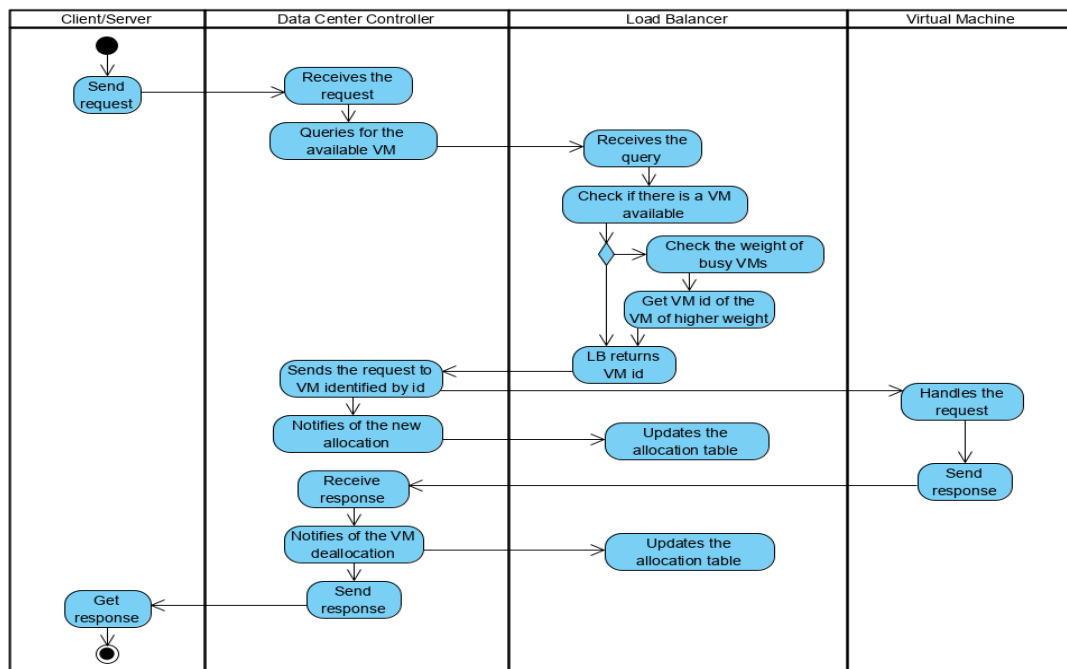


Fig. 1. Activity diagram for throttled load balancing

system scaling, a more sophisticated algorithm will have to be used to efficiently use all computing resources.

Deployment in the cloud. The chosen cloud platform is DigitalOcean, which provides computing units called drops (fig. 2). To ensure maximum data security and the fastest data processing in the cloud, we will use containerization in a virtual machine. Containerization will be provided by Docker Compose, as the system consists of several components (fig. 3). Also, to create containers, we will create virtual machines that have a specially designed OC for the best Docker support [13].

Comprasion of solutions. Let's compare the proposed solution with the solution where vertical scaling will be present. When using this scaling method, we need to move all the data from one virtual machine to another with higher characteristics (CPU, RAM, hard disk). In this case, LMS will be in downtime for a certain time:

$$t_{\text{downtime}} = t_{\text{allocation}} + t_{\text{transfer}}, \quad (1)$$

where t_{downtime} – downtime for LMS;

$t_{\text{allocation}}$ – time for hypervisor to allocate resources for VM;

t_{transfer} – time for transferring data from one VM to another.

Moreover, time for transferring data from one VM to another growing as more size of data is.

At table 1 we can find a simple comparison between the data size of VM and time for copying its data to another VM.

Here you can clearly see that the time to copy data is growing along with the volume of this data. Accordingly,

In the proposed solution, the downtime time formula remains the same (1), but the data transfer time will be constant, because it is limited by a certain template size of our virtual machine. Now we can get the efficiency and availability of the proposed solution (2):

$$Ef = \left(\frac{t_{\text{vert}}}{t_{\text{hor}}} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

where Ef – efficiency of the proposed solution;

t_{vert} – time for transferring data with vertical method;
 t_{hor} – time for transferring data with vertical method, we set it to 86, if we use 1024MB template of VM for deploy.

with each change of VM, the downtime will increase.

Table 1 – Dependency between time and data size

Size(MB)	Time(secs)
32	10
64	14
128	24
256	40
512	60
1024	86
2048	115
4096	148

Table 2 presents the efficiency calculations for two cases in which it is necessary to change a virtual machine that has a larger volume. You can see how the efficiency of solutions using horizontal scaling is growing in comparison with vertical.

Table 2 – Calculation of efficiency

t_{vert}	t_{hor}	Ef
115	86	43,75 %
148	86	85,00 %

These data are illustrated in more detail in Fig. 4.

Where y-axis is Efficiency and x-axis is the size of data in VM growth in the vertical method.

The implementation of this solution into the work of adaptive LMS will improve its efficiency. Now users will not need to wait more and more times each time before they can again access their training courses. Of course, increase their effectiveness during training [1].

Conclusions. The use of cloud platforms for the construction of distributed systems is a practice that allows to use only the required amount of computing capacity. This way you can focus on other aspects of the system.

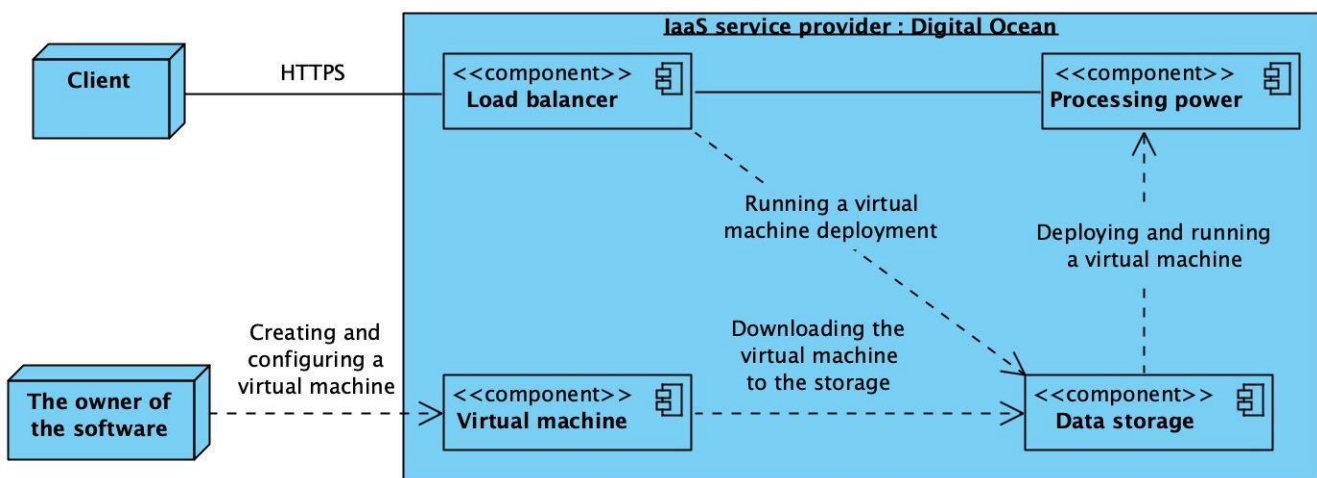


Fig. 2. Model of system operation using Digital Ocean cloud platform

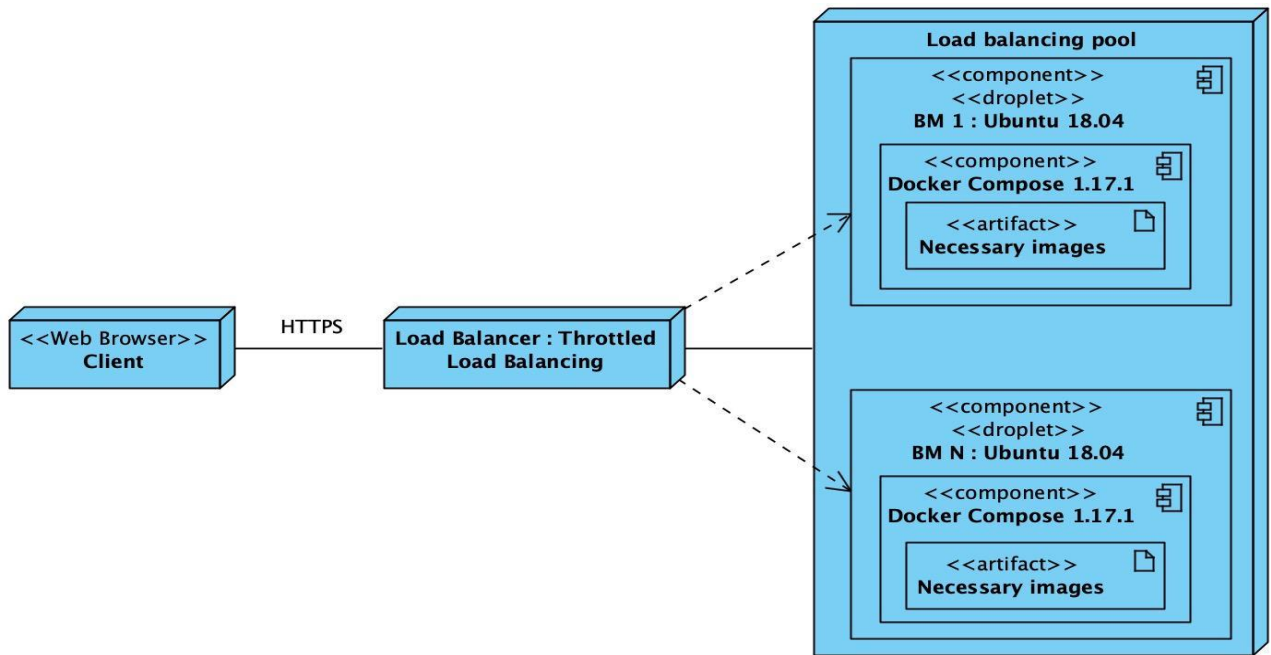


Fig. 3. Web application deployment diagram

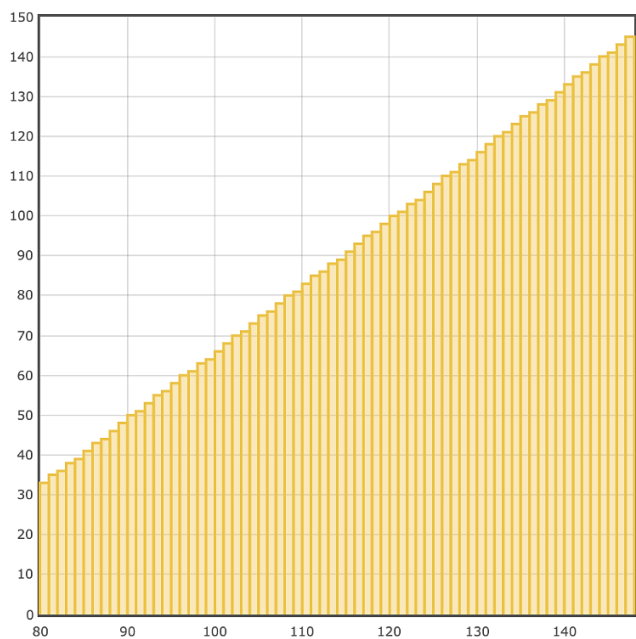


Fig. 4. Efficiency growth

Cloud computing and platforms, scalability, load balancing, virtualization, and deployment through containerization were reviewed during the work. The DigitalOcean platform was investigated their way of providing computing resources with Drop-lets.

As a result of analyzing information on existing technologies, approaches and methods for using cloud platforms in distributed systems, they have been applied to develop a solution to reduce downtime for a distributed adaptive LMS.

References

1. Sokol V., Tkachuk M., Godlevskiy M., Bilova M., Studenikin D. An Approach to ICT Professionals' Skills Assessment based on European e-Competence Framework. *Proceedings of the 16th ICTERI*

- Conference. Volume II: Workshops. Kharkiv, Ukraine, October 06–10, 2020. P. 677–692.
2. Sokol, V. Y., Bronin, S. V., Karnaukh, V. E., Bilova, M. O. Developing Adaptive Learning Management Application for Project Team in IT-Industry. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 1 (3). С. 97–105.
3. Sokol V. E., Tkachuk M. V., Vasetka Y. M. Adaptive Training System for IT-companies Personnel: Design Principles, Architectural Models and Implementation Technology. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 51 (1272). С. 38–43.
4. Definition of cloud platform. URL: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/cloud-platform> (access date: 13.10.2020)
5. Digital Ocean Hosting: We Review This Host's Big Claims So You Don't Have To. URL: <https://www.whoishostingthis.com/hosting-reviews/digitalocean/> (access date: 18.10.2020)
6. Volkova V. N., Chemenkaya L. V., Desyatirikova E. N., Hajali M., Khodar A., Osama A. Load balancing in cloud computing. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2018. P. 387–390.
7. Ab Rashid Dar, Ravindran D. Survey On Scalability In Cloud Environment. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*. 2016. Vol. 5, issue 7. P. 2124–2128.
8. Jain N., Choudhary S. Overview of virtualization in cloud computing. *2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*. 2016. P. 1–4.
9. Bokhari M. U., Shallal Q. M., Tamandani Y. K. Cloud computing service models: A comparative study. *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. 2016. P. 890–895.
10. Algarni, S. A., Ikbal, M. R., Alroobaea, R., Ghiduk, A. S., Nadeem, F. Performance Evaluation of Xen, KVM, and Proxmox Hypervisors. *International Journal of Open Source Software and Processes*. 2018. № 9(2). P. 39–54.
11. Maheshwari S., Deochake S., De Ridip, Grover Anish. Comparative Study of Virtual Machines and Containers for DevOps Developers. URL: https://www.researchgate.net/publication/327237114_Comparative_Study_of_Virtual_Machines_and_Containers_for_DevOps_Developers (access date: 10.11.2020)
12. Ahmad A. A.-S., Andras P. Measuring and Testing the Scalability of Cloud-based Software Services. *2018 Fifth International Symposium*

on Innovation in Information and Communication Technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/328768373_Measuring_and_Testing_the_Scalability_of_Cloud-based_Software_Services (access date: 18.10.2020)

13. Cailliau E., Aerts N., Noterman L., Groote L. A comparative study on containers and related technologies. URL: https://www.researchgate.net/publication/320961475_A_comparativ_e_study_on_containers_and_related_technologies (access date: 7.10.2020)

References (transliterated)

- Sokol V., Tkachuk M., Godlevskiy M., Bilova M., Studenikin D. An Approach to ICT Professionals' Skills Assessment based on European e-Competence Framework. *Proceedings of the 16th ICTERI Conference. Volume II: Workshops*. Kharkiv, Ukraine, October 06–10, 2020. P. 677–692.
- Sokol, V. Y., Bronin, S. V., Karnaukh, V. E., Bilova, M. O. Developing Adaptive Learning Management Application for Project Team in IT-Industry. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 1 (3), pp. 97–105.
- Sokol V. E., Tkachuk M. V., Vasetka Y. M. Adaptive Training System for IT-companies Personnel: Design Principles, Architectural Models and Implementation Technology. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 51 (1272), pp. 38–43.
- Definition of cloud platform. Available at: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/cloud-platform> (access date: 13.10.2020)
- Digital Ocean Hosting: We Review This Host's Big Claims So You Don't Have To. Available at: <https://www.whoishostingthis.com/hosting-reviews/digitalocean/> (access date: 18.10.2020)
- Volkova V. N., Chemenkaya L. V., Desyatirikova E. N., Hajali M., Khodar A., Osama A. Load balancing in cloud computing. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2018, pp. 387–390.
- Ab Rashid Dar, Ravindran D. Survey On Scalability In Cloud Environment. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*. 2016, Vol. 5, issue 7, pp. 2124–2128.
- Jain N., Choudhary S. (2016). Overview of virtualization in cloud computing. *2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*. 2016, pp. 1–4.
- Bokhari M. U., Shallal Q. M., Tamandani Y. K. Cloud computing service models: A comparative study. *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. 2016, pp. 890–895.
- Algarni, S. A., Ikbali, M. R., Alroobaea, R., Ghiduk, A. S., Nadeem, F. Performance Evaluation of Xen, KVM, and Proxmox Hypervisors. *International Journal of Open Source Software and Processes*. 2018, no. 9(2), pp. 39–54.
- Maheshwari S., Deochake S., De Ridip, Grover Anish. *Comparative Study of Virtual Machines and Containers for DevOps Developers*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/327237114_Comparative_Study_of_Virtual_Machines_and_Containers_for_DevOps_Developers (access date: 10.11.2020)
- Ahmad A. A.-S., Andras P. *Measuring and Testing the Scalability of Cloud-based Software Services*. 2018 Fifth International Symposium on Innovation in Information and Communication Technology. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328768373_Measuring_and_Testing_the_Scalability_of_Cloud-based_Software_Services (access date: 18.10.2020)
- Cailliau E., Aerts N., Noterman L., Groote L. A comparative study on containers and related technologies. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320961475_A_comparativ_e_study_on_containers_and_related_technologies (access date: 7.10.2020)

Received 12.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сокол Володимир Євгенович – 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/0000-0002-4689-3356>; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Сапронов Павло Юрійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9090-6206>; e-mail: rairundemps@gmail.com

Білова Марія Олексіївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: missalchem@gmail.com

Сокол Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Сапронов Павел Юрьевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9090-6206>; e-mail: rairundemps@gmail.com

Белова Мария Алексеевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: missalchem@gmail.com

Sokol Volodymyr Yevhenovych – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>; e-mail: vlad.sokol@gmail.com

Sapronov Pavlo Yuriyovych – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9090-6206>; e-mail: rairundemps@gmail.com

Bilova Mariia Oleksiivna – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: missalchem@gmail.com

О. Ю. ТОВСТОКОРЕНКО, Р. О. ГАМЗАЄВ, М. В. ТКАЧУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВАРІАБЕЛЬНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ НА ЕТАПІ СУПРОВОДУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

У статті розглянуто поточний стан наукових публікацій за темою інтелектуалізації усіх основних процесів повного життєвого циклу (full life cycle) програмних систем (ПС), підходи для побудови варіабельних моделей для систем «Розумний дім». Проведено огляд існуючих підходів до аналізу якості побудови таких рішень. Проаналізовано Feature-Oriented Development Architecture (FODA) модель системи розумний будинок, підкреслено актуальні проблеми проектування систем розумного дому. Проаналізовано стан публікацій за тематикою оцінки якості систем типу «Розумний дім». Потім запропонований підхід експериментальної оцінки супроводжуваності системи заснований на аналізі сумарних витрат необхідних для підготовки функціоналу системи для роботи. В ході проведення експериментальних розрахунків було використано доменну модель систем «Розумний дім» в двох варіантах, з використанням інтеграційного модулю та з використання окремих пристроїв управління, окремо для кожного з виробників. Запропонований підхід для оцінки альтернативних FODA моделей заснований критерієм «maintainability». В якості даних було використано час, необхідний для конфігурування програмного забезпечення для набору окремих модулів системи, та налаштування їх як єдиної системи. Отримані дані, що дозволяють прийняти рішення про вибір архітектури побудови системи ґрунтуючись на заданій доменній моделі, що містить набір пристроїв і опису наданих ними функцій. Результати роботи повинні стати основою для розробки централізованого сховища, для накопичення, аналізу та повторного використання конфігурації як окремих підмодулів систем «Розумний дім», так і цілих систем, які відповідають певним вимогам, у результаті чого буде запропоновано комплексний підхід до підвищення якості супроводу систем «Розумний дім» на прикладі показника супроводу.

Ключові слова: розумний дім, Інтернет речей, доменна модель, варіабельність, програмне забезпечення, конфігурування.

О. Ю. ТОВСТОКОРЕНКО, Р. А. ГАМЗАЕВ, Н. В. ТКАЧУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАРІАБЕЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НА ЭТАПЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ «УМНЫЙ ДОМ»

В статье рассмотрено текущее состояние научных публикаций по теме интеллектуализации всех основных процессов полного жизненного цикла (full life cycle) программных систем (ПС), подходы для построения варіабельных моделей для систем «Умный дом». Проведен обзор существующих подходов к анализу качества построения таких решений. Проанализированы Feature-Oriented Development Architecture (FODA) модель системы умный дом, подчеркнуты актуальные проблемы проектирования систем умного дома. Проанализировано состояние публикаций по тематике оценки качества систем типа «Умный дом». Затем предложенный подход экспериментальной оценки сопровождаемости системы основан на анализе суммарных затрат необходимых для подготовки функционала системы для работы. В ходе проведения экспериментальных расчетов была использована доменная модель систем «Умный дом» в двух вариантах, с использованием интеграционного модуля и с использованием отдельных устройств управления, отдельно для каждого из производителей. Предложенный подход для оценки альтернативных FODA моделей основан критерии «maintainability». В качестве данных было использовано время, необходимое для настройки программного обеспечения для набора отдельных модулей системы, и настройки их как единой системы. Полученные данные, позволяющие принять решение о выборе архитектуры построения системы основываясь на заданной доменной модели, содержит набор устройств и описания предоставляемых ими функций. Результаты работы должны стать основой для разработки централизованного хранилища для накопления, анализа и повторного использования конфигурации как отдельных подмодулей систем «Умный дом», так и целостных систем, отвечающих определенным требованиям, в результате чего будет предложен комплексный подход к повышению качества сопровождения систем «Умный дом» на примере показателя сопровождаемости.

Ключевые слова: умный дом, Интернет вещей, доменная модель, варіабельность, программное обеспечение, конфигурирование.

О. У. ТОВСТОКОРЕНКО, Р. О. ГАМЗАЄВ, М. В. ТКАЧУК

AN EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTIVENESS USAGE OF VARIABLE DESIGN SOLUTIONS BY MAINTENANCE STAGE OF SOFTWARE FOR “SMART-HOME” SYSTEMS

Article considers current state of scientific publications on topic of intellectualization of all main processes for full life cycle development of software systems, approaches to building variable models for “Smart Home” systems. A review of existing approaches to the analysis of quality of construction for such solutions. The Feature-Oriented Development Architecture (FODA) model of smart home system is analyzed, the current problems of smart home systems design are emphasized. The state of publications on topic of quality assessment of systems such as «Smart Home» is analyzed. Then, the proposed approach to experimental assessment of system maintenance is based on the analysis of the total costs required to prepare functionality of system for operation. In the course of experimental calculations, domain model of Smart Home systems was used in two variants, using an integration module and using separate control devices, separately for each of the manufacturers. The proposed approach for evaluating alternative FODA models is based on «maintainability» criterion. The time required to configure the software for a set of individual system modules and to configure them as a single system was used as data. The obtained data, allowing to make a decision on choice of construction architecture of system based on the set domain model, contains a set of devices and the description of functions provided by them. The results of the work should be the basis for the development of a centralized storage for the accumulation, analysis and reuse of the configuration of individual submodules of Smart Home systems and integrated systems that meet certain requirements, resulting in a comprehensive approach to improving the quality of Smart Home systems on the example of the traceability indicator.

Keywords: smart home, Internet of Things, domain model, variability, software, configuration.

Вступ. Протягом останнього десятиліття стає все більш актуальним питання інтелектуалізації усіх основних процесів повного життєвого циклу (full life cycle) відповідних програмних систем (ПС) [1–2]. Одним з основних переваг даного підходу до розробки

інформаційної системи є надання можливості прозорого управління всіма етапами розробки, впровадження та супроводу, за рахунок чого впроваджується певний функціонал, за рахунок якого стає можливим приймати більш ефективні рішення з точки зору як підвищення якості кінцевого продукту так і більш раціонального

витрачання фінансових коштів на розробку. Для підтримки таких процесів можуть застосовуватися наступні: доменне моделювання (domain modeling), методи підтримки варіабельності програмного забезпечення (software variability) та архітектурні моделі та технології розробки лінійок програмних продуктів (software product line) [3]. Незважаючи на широке використання перерахованих вище підходів в процесах розробки програмного забезпечення (ПЗ), залишається все ще актуальним і вимагає досліджень питання застосування подібних систем в області «Розумний дім» (“Smart-Home” systems – SHS) та Інтернет – речей (Internet of Things – IoT) [4, 5, 9–11]. Огляд науково-практичних розробок у галузі розробки SHS-систем дозволяє зробити висновок, що наразі існує досить значний прогрес у створенні високотехнологічних апаратно-програмних рішень, зокрема, з використання методів і технологій з інструментарію побудови IoT – систем і кіберфізичних систем (cyber-physical system) [6–8]. Одним з найменш проаналізованих питань в сьогодні є питання отримання кількісних оцінок ефективності процесів проектування та реалізації саме компонентів ПЗ шляхом забезпечення їх варіабельності та можливостей повторного використання лінійок програмних продуктів (ЛПП) в контексті IoT систем. Важливим питанням також є можливість отримання оцінок ефективності застосування варіабельних проектних рішень з точки зору їх впливу на трудомісткість процесів супроводу ПЗ систем «Розумний дім». Саме тому метою цього дослідження є розробка підходу до вирішення задачі оцінки ефективності застосування доменного моделювання для побудови варіабельних проектних рішень на етапі супроводу ПЗ таких систем.

Стислий огляд існуючих підходів до оцінки якості систем «Розумний дім». За даними [14] до 2021 року до IoT буде підключено приблизно 50 мільярдів пристроїв. Тому вирішальним фактором є якість функціоналу та ПЗ самих IoT пристроїв. Різні традиційні підходи до вимірювання якості програмного забезпечення потребують вдосконалення та адаптації до характеристик IoT. Стаття [14] пропонує детальний огляд моделі якості програмного забезпечення для IoT систем на основі ISO/EC25010 та атрибутів якості інформації COBIT 4.1. Авторами було виділено відображення та взаємозв'язок між характеристиками IoT та характеристиками якості програмного забезпечення на основі якості інформації. Отримані результати дослідження Johan J. та ін. планують використовувати як основу для створення контуру управління IoT системами. Одним з актуальних питань в рамках досліджень в контексті проектування IoT так само є питання аналізу і класифікації функціональних і не функціональних вимог [15]. Tainyi (Ted) Luor та ін. вперше запропонували застосувати модель Кано як теоретичну основу для формування класифікації функціональних можливостей SHS-систем, розглядаючи кожен з функцій з точки зору привабливості чи необхідності для потенційного користувача, або і те, і інше. Також, у [15] запропоновано три моделі та перевірка ставлення користувачів до трьох функціональних типів SHS-

систем. На основі моделі Кано розраховано основні результати, а саме два «Привабливі якості» (Attractive Quality) та дев'ять пунктів «Байдужа якість» (Indifferent Quality). Перевірка гіпотез також вказує на те, що функції розваг, безпеки та автоматизації суттєво корелюють зі змінними «сприймати корисне» (perceive useful) та «ставлення» (attitude). Tainyi (Ted) Luor та ін. зазначають, що міркування витрат негативно корелюють зі ставленням до розваг та автоматизації. Результати [15] показують, що постачальники SHS-систем повинні постійно досліджувати потреби користувачів у своєму продукті, тому що дана область є динамічною та постійно розвивається. З огляду на той факт, що більшість SHS-систем слід розглядати як ЛПП, з огляду на їх функціональні та архітектурні особливості [17], актуальним завданням є оцінка якості варіабельності для ЛПП. У роботі [16] представлено модельно-орієнтований (model-driven) інженерний метод та інструмент для оцінки якості конфігурацій товарної лінії шляхом перехресного аналізу архітектурного вигляду. Основним внеском цієї роботи є метамоделі, визначені для вираження сценаріїв оцінки якості, каталогів компонентів та точок чутливості всередині ЛПП та її архітектури. У [16] автори також пропонують набір способів переходу від моделі до моделі та від моделі до тексту, які можна використовувати для аналізу впливу рішення щодо конфігурації варіабельності на основі атрибутів якості в процесі конфігурації продукту. В той же час у таких роботах недостатньо опрацьованими залишаються питання отримання кількісних оцінок можливого підвищення ефективності процесів проектування та реалізації саме компонентів ПЗ шляхом забезпечення їх варіабельності та можливостей повторного використання у відповідних ЛПП, тому метою роботи є розробка підходу до вирішення задачі оцінки якості застосування доменного моделювання для побудови варіабельних проектних рішень на етапі супроводу ПЗ таких систем.

Моделювання варіабельних проектних рішень для побудови архітектури систем «розумний дім». Факт відсутності єдиного стандарту/протоколу зв'язку між пристроями та системами при розробці SHS-систем зумовлює необхідність поєднання окремих IoT – компонентів різних виробників в одну систему управління, з можливістю централізованого керування усім обладнанням [17].

Для відображення зазначеної проблеми було побудовано доменну модель (ДМ) з використанням нотації FODA [1, 2], яка наведена на рис. 1. Структура цієї моделі містить сенсори (sensor – пристрої, що збирають данні) та актуатори (actuator – пристрої, що виконують певні функції) різних виробників. Також на моделі відображено функції, які надає кожен з пристроїв. Функцію керування сенсорами та актуаторами виконує блок управління – «Hub». У [17] було виділено 2 варіанти реалізації третього рівня ДМ, перший співпадає з рис. 1 і містить Hub модулі для кожного з виробників, у другому варіанті запропоновано використати програмний модуль для управління та адаптації управління компонентами нижчих рівнів ДМ та їх функціями.

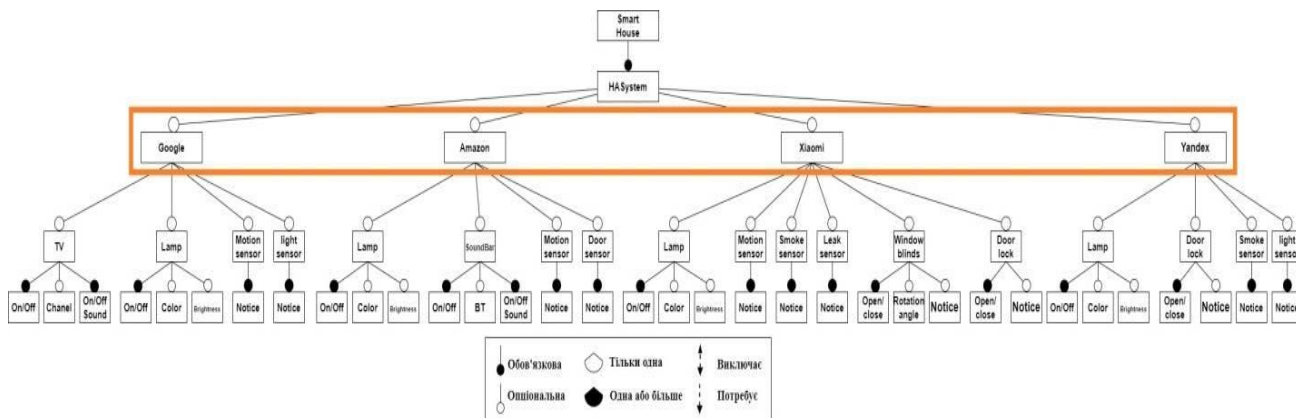


Рис. 1. ДМ SHS з пристроями різних виробників

На даний час зазначену в [17] проблему можна вирішити двома способами, перший – це використання набору окремих мобільних додатків для кожного з виробників (наведено на рис. 2). Другий (наведено на рис. 3) – використання модулю з операційною системою для управління IoT компонентами [12].

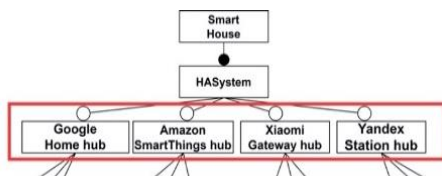


Рис. 2. Варіант 1 ДМ системи «Розумний дім». Рівень Hub для систем різних виробників [17]

При використанні варіанту архітектури системи з набором модулів Hub (рис. 2), з'являється необхідність у наступних процесах [17]:

- Налаштування зв'язку з кожним з Hub для IoTСУ.
- Окреме налаштування кожного з Hub.
- Налаштування зв'язку між Hub та певним пристроєм (сенсор/актуатор).
- Налаштування/мапінг функцій та сценаріїв для кожного пристрою (сенсор/актуатор) на рівні Hub.
- Налаштування/мапінг функцій та сценаріїв для кожного пристрою (сенсор/актуатор) на рівні системи управління IoT (IoTСУ).
- Як альтернатива пропонується використовувати уніфікований програмний модуль, який дозволить створювати, накопичувати, повторно використовувати конфігурації для інтеграції певних сенсори/актуатори та певних IoTСУ (рис. 3) [17].

Модуль пропонується розташовувати як частину системи IoTСУ. При використанні варіанту архітектури системи без набору Hub для кожного з виробників залишається необхідність у наступних процесах:

- Налаштування зв'язку між IoTСУ та певним пристроєм (сенсор/актуатор).
- Налаштування функцій та сценаріїв для кожного пристрою (сенсор/актуатор).

У [17] було наведено аналіз ефективності застосування запропонованого підходу за рахунок використання оцінки сполучної складності. Для порівняльного

аналізу зазначених архітектурних рішень пропонується використати підхід на основі оцінок часу необхідного для налаштування певного функціоналу для певної архітектури.

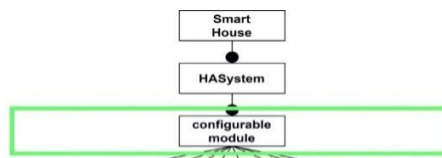


Рис. 3. Варіант 2 ДМ системи «Розумний дім» [17].

Експериментальне дослідження застосування запропонованого підходу. Для порівняння двох вищезгаданих варіантів ДМ пропонується використовувати показник супроводу програмних систем [18]. Розрахунки запропонованого показника базуються на сумі затрат, необхідних для підготовки певного функціоналу системи для роботи. В контексті IoTСУ даний процес це – налаштування компонент роботи в загальній SHS-системі (мережеві налаштування, встановлення режимів роботи, тощо). В якості затрат розглядається час, необхідний для налаштування певного функціоналу інженеру супроводу.

Таким чином, для розрахунку показника було проаналізовано етапи, наведені у попередньому пункті для двох варіантів моделі (рис. 2 та рис. 3) та складено таблицю параметрів для кожної з моделей (табл. 1).

Далі на основі зібраних даних розрахувати значення обраної метрики для кожної з моделей. Отриманий результат буде відображати приблизний загальний час, необхідний для налаштувань певного варіанту архітектури. Для оцінки якості запропонованого підходу було використано показник супроводу програмних систем [18]. В якості вхідних даних було використано доменну модель «Розумний дім» без використання запропонованого модуля та після модифікації [17]. Для розрахунку часу на налаштування системи було використано наступні формули [18]:

$$Maintainability = \frac{1}{Arch_n Conf(F)}, \quad (1)$$

де F – певний набір функцій системи;
 $Arch_n Conf(F)$ – ресурс (у розглянутій SHS – час) необхідний для підготовки певного функціоналу n ;

$$Arch_n Conf(F) = \sum_1^m Arch_n Conf(F_i), \quad (2)$$

де F_i – певна (i -та) функція системи; m – загальна кількість функцій системи.

В якості функцій системи було розглянуто найнижчий рівень ДМ (рис. 1). Для спрощення розрахунків, в якості часу для налаштувань було використано середнє значення для всіх кінцевих функцій системи, так як в даній роботі більш важливим є загальна різниця затраченого ресурсу. Таким чином, за середній час певного етапу налаштування було взято значення наведені у табл. 1. Доменна модель системи «Розумний дім» (рис. 1), представлена в попередньому пункті нараховує 16 побутових пристроїв, які в свою чергу пропонують 34 функції.

У табл. 1 усі етапи належать до процесу налаштування у випадку застосування першої архітектури, сірим кольором виділено етапи необхідні для налаштування системи, на основі архітектури за використанням запропонованого модуля.

Таким чином, час, що є необхідним для налаштування зазначеного в доменній моделі функціоналу для архітектури 1:

$$Maintainability_{Arch_1} = \frac{1}{8 + 4 + 17 + 3 + 25,5} \approx 0,0173$$

Час необхідний для налаштування функціоналу для архітектури 2:

$$Maintainability_{Arch_2} = \frac{1}{17 + 25,5} \approx 0,0235$$

Як видно з розрахунків критерію супроводу, застосування запропонованої модифікації архітектури системи «Розумний дім» веде до підвищення показника якості, а саме супроводу системи.

Висновки та подальша робота. Результатом проведеного аналізу сучасних науково-практичних розробок у галузі створення SHS-систем було виявлено, що недостатньо опрацьованими залишаються питання оцінок якості моделей в домені IoT систем. В роботі було розглянуто архітектуру системи типу «Розумний дім»,

підкреслено проблеми, існуючі в процесах проектування подібних систем, запропоновано підхід для оцінки якості доменної моделі, на основі показника супроводу. В подальших роботах планується розробка централізованого сховища для накопичення певних налаштувань, що з часом дозволить повторне використання конфігурацій, в результаті чого показник супроводу планується підвищити більше, та запропонувати більш детальні підходи до аналізу якості зазначених моделей.

Список літератури

- Berger Th., Chechik M., Kehler T. Software Evolution in Time and Space: Unifying Version and Variability Management. *Dagstuhl Seminar Reports*. 2019. Vol. 9, issue 5. P. 1–31.
- Steinberger M., Reinhartz-Berger I., Tomer A. Cross Lifecycle Variability Analysis: Utilizing Requirements and Testing Artifacts. *Journal of Systems and Software*. 2018. Vol. 143. P. 208–230.
- Gamzayev R. O., Karaçuha E., Tkachuk M. V., Tovstokorenko O. Y. An Approach to Assessment of Dynamic Software Variability in Mobile Applications Development. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна*. Харків, 2018. № 40. С. 14–25.
- Mazzara M., Afanasyev I., Sarangi S. R., Distefano S., Kumar V., Ahmad M. A Reference Architecture for Smart and Software-Defined Buildings. *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP 2019)*. Washington DC, USA. IEEE Publ., 2019. P. 167–172. DOI: 10.1109/SMARTCOMP.2019.00048.
- Pandit D., Pattanaik S. Software Engineering Oriented Approach to Iot-Applications: Need of the Day. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019. Vol. 7, issue 6. P. 886–895.
- Rawat, D. B., Rodrigues J. J., Stojmenovic I. *Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2015. 588 p.
- Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A. Y. C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems: Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*. 2019. Vol. 5, issue 4. P. 653–661.
- Береговський В. В. Математичне та програмне забезпечення автоматизованого проектування систем «Інтелектуального Будинку»: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец.: 05.13.12 «Системи автоматизації проектувальних робіт». Львів, 2017. 23 с.
- Sosa-Reyna C. M., Tello-Leal E., Lara-Alabazares D., Mata-Torres J. A., Lopez-Garza E. Methodology Based on Model-Driven Engineering for IoT Application Development. *Proceeding of the Twelfth International Conference on Digital Society and eGovernments (ICDS 2018)*, March 25-29. Rome, 2018. P. 36–41.

Таблиця 1 – Параметри процесу налаштування системи «Розумний дім»

Етапи налаштування IoTСУ	Необхідний ресурс (людино-години)	Рівень налаштувань відносно доменної моделі	Кількість елементів в системі	Час, необхідний для налаштування системи для приведеної доменної моделі (людино-години)
Налаштування зв'язку з кожним з хабів для IoTСУ	2,00	Hub	4	8,0
Окреме налаштування кожного з Hub	0,25	Hub – сенсорів/актуаторів	16	4,0
Налаштування зв'язку між Hub та пристроєм (сенсор/актуатор)	0,50	Hub – сенсорів/актуаторів	34	17,0
Налаштування/мапінг функцій та сценаріїв для кожного пристрою (сенсор/актуатор) на рівні хабів	0,75	Hub – IoTСУ	4	3,0
Налаштування/мапінг функцій та сценаріїв для кожного пристрою (сенсор/актуатор) на рівні IoTСУ	0,75	IoTСУ – сенсорів/актуаторів	34	25,5

10. Huber R. X. R., Püeschel L. C., Röglinger M. Capturing smart service systems: Development of a domain-specific modelling language. *Information Systems Journal*. 2019. Vol. 29, issue 6. P. 1207–1255.
11. Tzeremes V., Hassan G. A Software Product Line Approach to Designing End User Applications for the Internet of Things. *Proceedings of the 13th International Conference on Software Technologies (ICSOFT 2018)*. Porto, 2018. P. 656–663.
12. Ткаченко М. В., Товстокоренко О. Ю. Використання концепції лінійок програмних продуктів в контексті процесу проектування систем «Розумний дім». *Наукові підсумки 2019 року. XXXVII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція. Місто Вінниця. 09 грудня 2019 року. Ч. 14*. Вінниця, 2019. С. 84.
13. Пархоменко А., Туленков А., Соколянський О., Гладкова О., Залобовський Я. Дослідження та розробка методу веб-орієнтованого прототипування при проектуванні смарт систем. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля*. 2018. № 6 (247). С. 101–109.
14. Tambotoh J.J.C., Isa S. M., Gaol F. L., Soewito B., Warnars H.L.H.S. Software quality model for Internet of Things governance. *Proceedings of 2016 International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*. Denpasar, Bali, Indonesia, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICoDSE.2016.7936138.
15. Luor T., Lu H.-P., Yu H., Lu Y. Exploring the Critical Quality Attributes and Models of Smart Homes. *Maturitas*. 2015. Vol. 82, issue 4. P. 377–386. DOI: 10.1016/j.maturitas.2015.07.025.
16. Guana V., Dario C. Variability quality evaluation on component-based software product lines. *ACM International Conference Proceeding Series. Software Product Lines – 15th International Conference. SPLC 2011, Munich, Germany, August 22–26, 2011*. New York, Association for Computing Machinery, 2011. Vol. 2, article no. 19. P. 1–8. DOI: 10.1145/2019136.2019191.
17. Гамзаєв Р. О., Ткачук М. В., Товстокоренко О. Т. Застосування методів доменного моделювання для підтримки варіабельності програмного забезпечення в розробці систем «Розумний будинок». Інформаційні системи та технології. ICT-2020. Матеріали 9-ї Міжнародної науково-технічної конференції 17.11. 2020 р. Коблеве-Харків, Україна (у друку).
18. Cheaito R., Frappier M., Matwin S., Mili A., Crabtree D. *Defining and Measuring Maintainability. Technical Report*. Ottawa: Dept. of Computer Science, University of Ottawa, 1995. 12 p.
- Correlation and Comparison. *Engineering*. 2019, vol. 5, issue 4, pp. 653–661.
8. Berehovskiy V. V. Matematychnе та програмне забезпечення автоматизованого проєктування систем "Інтелектуального Будинку": автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.12 "Systemy avtomatyzaciyi proektivnykh robot" [Mathematical and software for automated design of "Smart Home" systems. Abstract of a thesis cand. eng. sci. diss. 05.13.12 "Systems of Automation of Design Works"]. Lviv, 2017. 23 p.
9. Sosa-Reyna C. M., Tello-Leal E., Lara-Alabazares D., Mata-Torres J. A., Lopez-Garza E. Methodology Based on Model-Driven Engineering for IoT Application Development. *Proceeding of the Twelfth International Conference on Digital Society and eGovernments (ICDS 2018), March 25–29, Rome, 2018*, pp. 36–41.
10. Huber R. X. R., Püeschel L. C., Röglinger M. Capturing smart service systems: Development of a domain-specific modelling language. *Information Systems Journal*. 2019, vol. 29, issue 6, pp. 1207–1255
11. Tzeremes V., Hassan G. A Software Product Line Approach to Designing End User Applications for the Internet of Things. *Proceedings of the 13th International Conference on Software Technologies (ICSOFT 2018)*. Porto, 2018, pp. 656–663.
12. Tkachenko M. V., Tovstokorenko O. Yu. Vykorystannya koncepciyi liniyok programnykh produktiv v konteksti procesu proyektuvannya system «Rozumnyj dim» [Using the concept of software lines in the context of the design process of «Smart Home» systems]. *Naukovi pidsumky 2019 roku. XXXVII Mizhnarodna naukovo-praktychna internet-konferenciya. Misto Vinnytsya. 09 hrudnya 2019 roku. Ch. 14* [Scientific results of 2019. XXXVII International scientific-practical Internet conference. City Vinnytsa. 09 December 2019. Part 14]. Vinnytsa, p. 84.
13. Parhomenko A., Tulenkov A., Sokolyans'kij O., Gladkova O., Zalyubovs'kij Ya. Doslidzhennya ta rozrobka metodu web-orientovanoho prototypuvannya pry proektuvanni smart system [Research and development of web-oriented prototyping method in the design of smart systems]. *Visnik Shhidnoukraïns'kogo Nacional'nogo Universitetu imeni Volodimira Dalya* [Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University]. 2018, no. 6 (247), pp. 101–109.
14. Tambotoh J.J.C., Isa S. M., Gaol F. L., Soewito B., Warnars H.L.H.S.. Software quality model for Internet of Things governance. *Proceedings of 2016 International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*. Denpasar, Bali, Indonesia, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICoDSE.2016.7936138.
15. Luor T., Lu H.-P., Yu H., Lu Y. Exploring the Critical Quality Attributes and Models of Smart Homes. *Maturitas*. 2015, vol. 82, issue 4, pp. 377–386. DOI: 10.1016/j.maturitas.2015.07.025.
16. Guana V., Dario C. Variability quality evaluation on component-based software product lines. *ACM International Conference Proceeding Series. Software Product Lines – 15th International Conference. SPLC 2011, Munich, Germany, August 22–26, 2011*. New York, Association for Computing Machinery Publ., 2011, vol. 2, article no. 19, pp. 1–8. DOI: 10.1145/2019136.2019191.
17. Hamzayev R. O., Tkachuk M. V., Tovstokorenko O. T. Zastosuvannya Metodiv Domennoho Modelyuvannya dlya Pidtrymky Variabelnosti Programnoho Zabezpechennya v Rozrobci System «Rozumnyj Budynok» [Application of Domain Modeling Methods to Support Software Variability in Smart Home Systems Development]. *IST-2020. Materiali 9-ji Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferencii 17.11.2020 r. Kobleve-Harkiv, Ukraïna* [IST-2020. Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference 17.11.2020. Kobleve-Kharkiv, Ukraine]. In print.
18. Cheaito R., Frappier M., Matwin S., Mili A., Crabtree D. *Defining and Measuring Maintainability. Technical Report*. Ottawa: Dept. of Computer Science, University of Ottawa Publ., 1995. 12 p.

Hadziusha (received) 10.11.2020

References (transliterated)

1. Berger Th., Chechik M., Kehler T. Software Evolution in Time and Space: Unifying Version and Variability Management. *Dagstuhl Seminar Reports*. 2019, vol. 9, issue 5, pp. 1–31.
2. Steinberger M., Reinhartz-Berger I., Tomer A. Cross Lifecycle Variability Analysis: Utilizing Requirements and Testing Artifacts. *Journal of Systems and Software*. 2018, vol. 143, pp.208–230.
3. Gamzayev R. O., Karaçuha E., Tkachuk M. V., Tovstokorenko O. Y. An Approach to Assessment of Dynamic Software Variability in Mobile Applications Development. *Visnyk XNU imeni V. N. Karazina* [Bulletin of KhNU named after V.N. Karazina]. Kharkiv, 2018, no. 40. pp.14–25.
4. Mazzara M., Afanasyev I., Sarangi S. R., Distefano S., Kumar V., Ahmad M. A Reference Architecture for Smart and Software-Defined Buildings. *IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP 2019)*. Washington DC, USA. IEEE Publ., 2019. P. 167–172. DOI: 10.1109/SMARTCOMP.2019.00048.
5. Pandit D., Pattanaik S. Software Engineering Oriented Approach to Iot - Applications: Need of the Day. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019, vol.7, issue 6, pp. 886–895.
6. Rawat D.B., Rodrigues J.J., Stojmenovic I *Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice*. Boca Raton, Florida, CRC Press Publ., 2015. 588 p.
7. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A. Y. C. Nee. Digital Twins and Cyber-Physical Systems: Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0:

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Товстокоренко Олег Юрійович – аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2664-1650>; e-mail: tovstokorenko@gmail.com.

Гамзаєв Рустам Олександрович – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: rustam.gamzayev@gmail.com.

Ткачук Микола Вячеславович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua.

Товстокоренко Олег Юрьевич – аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ул. Кирпичева, 2, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2664-1650>; e-mail: tovstokorenko@gmail.com.

Гамзаєв Рустам Олександрович – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, площа Свободи, 4, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: rustam.gamzayev@gmail.com.

Ткачук Микола Вячеславович – доктор технічних наук, професор завідувач кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, площа Свободи, 4, Харків, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua.

Tovstokorenko Oleh Yurievich – PhD student of the Department of Software Engineering and Information Technology Management, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», st. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2664-1650>; e-mail: tovstokorenko@gmail.com.

Gamzayev Rustam Olexandrovich – PhD, associate professor; Associate Professor of Modeling Systems and Technologies, Kharkiv National University named after VN Karazina, Maidan Svobody, 4, Kharkiv, Ukraine, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: rustam.gamzayev@gmail.com.

Tkachuk Mykola Vyacheslavovich – doctor of technical sciences, professor; Head of the Department of Modeling of Systems and Technologies, VN Kharkiv National University Karazina, Maidan Svobody, 4, Kharkiv, Ukraine, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua.

УДК 004.89:510.635

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.08

Y. R. SELIVORSTOVA, I. V. LIUTENKO, S. V. OREKHOV**FRAMEWORKS ANALYSIS AND EVALUATION USED IN THE WEB-APPLICATION DEVELOPMENT**

This article presents the approaches used to analyze and evaluate modern frameworks that are used in the development of web applications. The analysis and evaluation of frameworks allow you to choose the framework that can be most efficaciously used for each specific case of software development. The popularity of using frameworks in the development of web applications is due to a significant reduction in the time and other resources spent on project execution. The article describes the concept of a framework as a technology for developing web applications and the classification of frameworks. Five main types of frameworks are briefly described. Criteria for the rationality of using frameworks for developing a web application are considered. The advantages and disadvantages of using them when creating web-oriented software are given. When evaluating web applications according to COCOMO model, software options were considered with the use of frameworks in development, and without the use of frameworks. This article provides an overview of the families of modern Back-End frameworks. A comparison of the functionality of the Back-End frameworks of six manufacturers for commercial software solutions is carried out. The choice of criteria for assessing the quality of frameworks is examined. As a basis, when choosing quality criteria, it is proposed to use the ISO 25010 standard. The coefficients of importance for the evaluation criteria, the values of which were obtained with the help of experts, are given. When forming the final assessment of the frameworks, such characteristics as functional suitability, security of working with data, modifiability, interface quality, interaction with payment systems, and integration with JIRA, compatibility, productivity were mentioned. General quality scores were obtained for all the frameworks under consideration. Assessing the quality of frameworks allows you to improve the process of developing a web-oriented software product, the purpose of which is to obtain a web application of a given quality.

Keywords: software, framework, Back-End, web applications, quality assessment, assessment criteria.

Ю. Р. СЕЛІВЬОРСТОВА, І. В. ЛЮТЕНКО, С. В. ОРЄХОВ**АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА ФРЕЙМВОРКІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ WEB-ДОДАТКІВ**

У даній статті представлені підходи, які використовуються для аналізу та оцінки сучасних фреймворків, які використовуються при розробці веб-додатків. Аналіз і оцінка фреймворків дозволяє обрати фреймворк, який найбільш ефективно може бути використаний для кожного конкретного випадку розробки програмного забезпечення. Популярність використання фреймворків при розробці веб-додатків обумовлена істотним зменшенням витрат тимчасових і інших ресурсів на виконання проекту. У статті наведено поняття фреймворку, як технології розробки веб-додатків і класифікація фреймворків. Коротко охарактеризовані п'ять основних типів фреймворків. Розглядаються критерії раціональності використання фреймворків для розробки веб-додатки. Наводяться переваги і недоліки використання їх при створенні веб-

© Y. R. Selivorstova, I. V. Liutenko, 2020

орієнтованого програмного забезпечення. При оцінці веб-додатків по моделі COCOMO розглянуті варіанти програмного забезпечення з використанням фреймворків в розробці, і без використання фреймворків. У статті наведено огляд сімейств сучасних Back-End фреймворків. Проведено порівняння функціональності Back-End фреймворків шести виробників для комерційних програмних рішень. Розглянуто вибір критеріїв для оцінки якості фреймворків. В якості основи, при виборі критеріїв якості, запропоновано використовувати стандарт ISO 25010. Наведено коефіцієнти важливості для критеріїв оцінки, значення яких отримані за допомогою експертів. При формуванні підсумкової оцінки фреймворків розглядалися такі характеристики як функціональна придатність, безпека роботи з даними, можливість модифікування, якість інтерфейсу, інтеграція з платіжними системами і інтеграція з JIRA, сумісність, продуктивність. Отримано загальні оцінки якості для всіх розглянутих фреймворків. Проведення оцінки якості фреймворків дозволяє поліпшити процес розробки веб-орієнтованого програмного продукту, метою якого є отримання веб-додатку заданої якості.

Ключові слова: програмне забезпечення, фреймворк, Back-End, web-додатки, оцінка якості, критерії якості.

Ю. Р. СЕЛИВЁРСТОВА, И. В. ЛЮТЕНКО, С. В. ОРЕХОВ

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ФРЕЙМВОРКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ

В данной статье представлены подходы, используемые для анализа и оценки современных фреймворков, которые используются при разработке web-приложений. Анализ и оценка фреймворков позволяет выбрать фреймворк, который наиболее эффективно может быть использован для каждого конкретного случая разработки программного обеспечения. Популярность использования фреймворков при разработке веб-приложений обусловлена существенным уменьшением затрат временных и других ресурсов на выполнения проекта. В статье приведены понятие фреймворка, как технологии разработки веб-приложений и классификация фреймворков. Кратко охарактеризованы 5 основных типов фреймворков. Рассматриваются критерии рациональности использования фреймворков для разработки веб-приложения. Приводятся преимущества и недостатки использования их при создании веб-ориентированного программного обеспечения. При оценке веб-приложений по модели COCOMO рассмотрены варианты программного обеспечения с использованием фреймворков в разработке, и без использования фреймворков. В статье приведен обзор семейств современных Back-End фреймворков. Проведено сравнение функциональности Back-End фреймворков 6 производителей для коммерческих программных решений. Рассмотрен выбор критериев для оценки качества фреймворков. В качестве основы, при выборе критериев качества, предложено использовать стандарт ISO 25010. Приведены коэффициенты важности для критериев оценки, значения которых получены с помощью экспертов. При формировании итоговой оценки фреймворков рассматривались такие характеристики как функциональная пригодность, безопасность работы с данными, модифицируемость, качество интерфейса, интеграция с платежными системами и интеграция с JIRA, совместимость, продуктивность. Получены общие оценки качества для всех рассматриваемых фреймворков. Проведение оценки качества фреймворков позволяет улучшить процесс разработки веб-ориентированного программного продукта, целью которого является получение веб-приложения заданного качества.

Ключевые слова: программное обеспечение, фреймворк, Back-End, web-приложения, оценка качества, критерии оценки.

Introduction. The massive appearance of sites has provoked the development of high-quality web-applications. The popularity of developing web resources for disseminating information has prompted the world to create new systems and programs that greatly facilitate the writing and development of web applications. These programs provide an opportunity to easily and simply increase the efficiency and speed of development at a lower cost, and the developer can focus on improving the understanding of the business logic of the program. A variety of programming languages, databases, and frameworks based on them contribute to the development and integration of various components.

Nowadays, frameworks have become very popular and are the most important part of web application development, they offer and define the structure of software. Using frameworks saves a lot of time by increasing the number of components for developers written for them, limiting the load of development processes, reducing project costs, using code duplication issues, and helping to build programs quickly. Developing a web application without the use of a framework becomes a difficult task to create, maintain, and upgrade all stages of the software life cycle. Also, the use of frameworks makes the process of creating programs more accessible and functional.

There are a large number of frameworks for developing web applications. Choosing the right framework for work is a difficult task because each of them has a large number of attractive features that the other does not have. To select a framework, you must first consider all existing solutions and choose the most appropriate for the task.

The purpose of this article is to present an approach to the analysis and evaluation of frameworks for web application development, which will improve the quality of software development. By choosing the right and based on the functionality framework, you can significantly reduce development time and create software, which corresponds to modern quality assessments.

Framework as a technology for developing web applications. "Framework" is a "construction" or "structure" [1]. It is a kind of special-purpose software environment that is used to significantly facilitate the process of combining certain components when creating programs. The framework allows you to add components as needed. It is the basis on which you can create a program for any purpose quickly and easily.

We can highlight a significant advantage of frameworks if we compare a framework and a dynamic library (DLL) with limited functionality. It is the link that unites all the software components used. Also, within the framework, there are often the necessary thematic libraries that are needed to develop a specific software system [1].

Classification of frameworks:

- application frameworks – use the paradigm of object-oriented programming, automate the process of creating graphical interfaces;
- software system frameworks – frameworks of a system or subsystem that have everything to facilitate the development and grouping of various components; include frameworks for the web;
- conceptual model frameworks – it is a theoretical concept of the given structure for decision-making methods of some problems or difficulties.

All of these frameworks make it easier to create an interface, connect to a database, and reduce the likelihood of duplicate code. Also, most modern frameworks are built on the MVC (Model View Controller) architecture, which proposes to divide the future system into independent parts so that changing one of the elements has minimal impact on other components [1].

The types of web-frameworks are shown in the following fig. 1. Knowing the types of frameworks makes it easier to choose a tool for developing a web application.

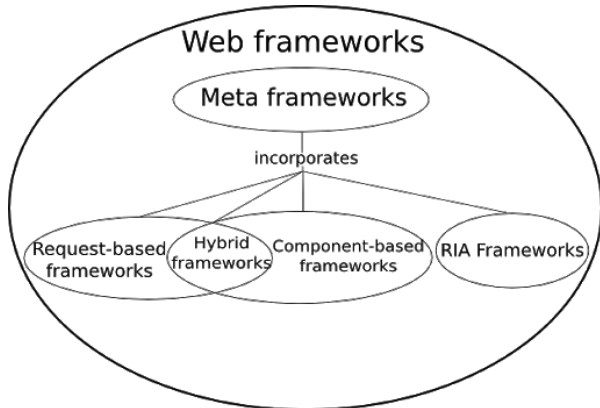


Fig. 1. Types of web-frameworks

Consider the types of frameworks in more detail [2]:

Request-based. Used to process requests from the user, but the data is stored only through sessions. Examples: Django, Ruby on Rails, Struts, Grails.

Component-based. Serve to abstract the processing of requests from the user inside the components and independently monitor the status, reminiscent of conventional graphical tools. Examples: JSF, Tapestry, Wicket.

Hybrid-based. It is combining request-based and component-based frameworks. They take control of all data and logical flow in the model generated in response to a request from the user of the system. The main advantage of such frameworks is that hybrid frameworks provide an object model of components that behaves differently in different situations. Besides, components can be separated and effectively added to other projects. Example: RIFE.

Meta-based. They have interfaces for general product maintenance and an easily extensible basis for adding new components and services. Example: Keel.

RIA-based. Exist to develop Rich Internet Applications (RIA), help develop applications that run in the browser. Examples: Flex, SAP Hybris.

Request-based and component-based are the most popular web frameworks.

Criteria to the rational use of frameworks for web application development. To better understand the need for frameworks in the development of web applications, you should focus on the criteria for the rational use of frameworks, which are given in table 1 [3].

Frameworks simplify the development of scalable and unique web applications. Although development using ready-made CMS is uncomplicated, unlike buildout with frameworks, but CMS is not designed for this. It should be noted that all unique web-applications developed with the

help of the framework are developing dynamically. When a developer changes the system, for example, with a novelty in design, a new article, or section, it is enough to add only a new module.

Table 1 – Criteria for the functionality of using the framework

Name	Characteristic
Database support	Database support is an influential point because some frameworks support ORM and some do not, so depending on this criterion, you should choose the right framework for development.
Community support	The framework has to support the possibility of the simultaneous work of several developers.
Documentation	Some frameworks do not have documentation, or it is, but not relevant, so when choosing a framework, you should take into account the availability of appropriate, all the time updated documentation.
Productivity	The framework has to be productive in any system. Currently, a large number of frameworks are not efficient.
Threshold of familiarization	It is a crucial factor because it can happen that a year is not enough to become the master in the selected framework, and you have to develop a web application as soon as possible.
Development speed	Different frameworks require different time to develop an application.
Architecture	Give your preference to those frameworks that were designed using the MVC architectural pattern. It will help you in application development.
Using templates when developing UI	Using templates for the user interface significantly reduces resource costs.

Thus, the following are the advantages of using frameworks in the development of web-applications:

- software's flexibility and extensibility by adding additional libraries to the source code;
- the use of the MVC architectural approach, which extends the flexibility of the project and allows the output to receive clean code to facilitate further support;
- the existence of detailed documentation on the intricacies of development using the selected framework;
- security of use for prevention of hacking of the system;
- all the code is essential in the system, unlike a CMS (CMS creates countless code that is not used, and it reduces the efficiency of the project);
- an excellent output.

The disadvantages of using frameworks in the development of web-applications are somewhat insignificant compared to the advantages:

- the cost of development is cheaper than creating using a CMS because the time spent on development is several times less;
- difficulty in mastering;
- difficulty in maintenance;

• the requirement to develop unique additional modules and components that are put forward by the client.

Thus, comparing the existing advantages and disadvantages of using frameworks, we can conclude that the development of web-applications using frameworks is the best solution.

Evaluation of software with and without using framework by COCOMO model. In addition to the criteria for the rational use of frameworks, the software can also be evaluated by the COCOMO model by the number of lines in the developed web-application.

A web application developed using the framework is 40 KLOC in size and 63 KLOC without the framework. We calculate the costs and the time required for development according to COCOMO model [4]. For this purpose, we will use formulas 1-2, and we will take the data for them from table 2.

$$E = a_b * (KLOC)^{b_b} \quad (1)$$

where E – an effort in person-months;

$KLOC$ – the number of lines of the code in thousands;

a_b and b_b – data from table 2.

$$D = c_b * E^{d_b} \quad (2)$$

where D – amount of time required for the completion of the job in months;

$KLOC$ – the number of lines of the code in thousands;

c_b and d_b – data from table 2.

Thus, a web application developed using a framework belongs to an organic type of software, and without a framework to a semi-detached.

Table 2 – Constant values for COCOMO model

Software projects	a_b	b_b	c_b	d_b
Organic (2-50 KLOC)	2.40	1.05	2.50	0.38
Semi-detached (51-300 KLOC)	3.00	1.12	2.50	0.35
Embedded (>300 KLOC)	3.60	1.20	2.50	0.32

Thus, we have the following estimates of the efforts and duration of development using the framework:

$$E = a_b * (KLOC)^{b_b} = 2.4 * 40^{1.05} = 115.44$$

$$D = c_b * E^{d_b} = 2.5 * 115.44^{0.38} = 15.19$$

Therefore, using the framework, the development of a web application requires 115.44 person-months and 15.19 months. Let's calculate the cost of creating without using the framework:

$$E = a_b * (KLOC)^{b_b} = 3 * 63^{1.12} = 310.73$$

$$D = c_b * E^{d_b} = 2.5 * 310.73^{0.35} = 18.63$$

Based on the calculations made, without the use of the framework for the development of web-application requires 310.73 person-months and 18.63 months, which is much more than creating using the framework. Therefore, we can conclude that developing a web-application with the

framework significantly accelerates it because the development time is reduced by almost 4 months.

An overview of modern Back-End frameworks.

For Back-End, there are hundreds of frameworks implemented in different programming languages, such as Java, JavaScript, PHP, C#. Here are some of them for developing web applications using these languages.

SAP Hybris. It is a family of products of the German company Hybris, which sells software for e-commerce, marketing, sales, service, and product content management. SAP Hybris provides solutions that help any organization reduce costs, save time, simplify development, and require less attention to achieve excellent customer service [5]. The Hybris product focuses on the following main areas:

- commerce;
- marketing;
- billing;
- sales;
- service;
- Hybris as a service.

IBM. IBM's cloud platform combines Platform as a service (PaaS) with Infrastructure as a service (IaaS) to provide an integrated experience. The platform scales and supports both small development and organization teams and large business enterprises [6]. An integral part of it is source technologies such as Kubernetes, Red Hat OpenShift, and a full range of computing options. Thereby, the project has as much control and flexibility as the customer needs to support workloads in a hybrid environment. The developer can deploy applications that run in the cloud while ensuring the mobility of the workload.

ATG. Oracle ATG Web Commerce programs implement a component development model based on JavaBeans and JSP. The developers assemble programs from components by linking them between configuration files in Nucleus, Oracle's open object structure ATG Web Commerce. Page designers build an interface for a JSP application that uses the Oracle ATG Web Commerce DSP tag library. The DSP tag library allows you to embed Nucleus components in the JSP and use these components to supply dynamic content. This structural solution provides easy interaction between the programmer and the layout designer [7].

Demandware. Provides a cloud-based single e-commerce platform with mobile devices, Artificial Intelligence personalization, order management capabilities, and related services for Business to Consumer (B2C) and Business to Business (B2B) retailers and brand manufacturers worldwide [8].

Magento. An e-commerce platform was built on open-source technology that provides online retailers with a flexible shopping system, as well as control over the appearance, content, and functionality of their online store [9].

Heiler. Specializes in SAP customers and supports the purchase of companies in SRM and suppliers with the extraction, conversion, and publication of their product information, providing comprehensive solutions consisting of the latest software technologies [8]. Heiler provides distributors and manufacturers with product information

management support that allows them to optimize the information process with their customers.

Comparison of Back-End framework functionality. Each of these frameworks is a fitting solution and attracts with its advantages. Unfortunately, you have to make a choice based on the project to be developed because none of the frameworks can solve all the problems for any project. A comparison of the main functionalities of the above frameworks was shown in table 3.

Compared to IBM, Oracle, and others, the SAP Hybris web application development platform is ahead of its nearest competitors in many respects [10]:

- thoughtful architecture, which was created on the latest stack of Java-technologies;
- universal functionality in its class;
- accelerators for B2C and B2B commerce significantly accelerate the project;
- depending on the customer's needs, different software installation, and payment methods.

Criteria for assessing the quality of frameworks.

The above frameworks for web application development have plenty of functionality. To more accurately select the framework for application development, it is necessary to choose quality criteria and their impact on the efficiency of development and implementation of the requirements. It was proposed to use the ISO 25010 standard as a basis for the selection of quality criteria. According to ISO 25010, quality software must meet the following norms [11]:

- functional suitability (completeness, correctness, expediency);
- efficiency (temporary behavior, use of resources, bandwidth);
- compatibility (coexistence, compatibility);
- usability (compliance of functions to needs, ability to learn, working capacity, protection against user errors, aesthetics of the user interface, accessibility);
- reliability (maturity, availability, failure stability, reproducibility);
- security (confidentiality, integrity, indisputability, responsibility, authenticity);
- maintainability (modularity, reusability, analysis, modification, testing);
- portability (manufacturability, the possibility of installation, and replacement).

The criteria described in ISO 25010 are used to assess the quality of the software. In our case, we will evaluate the previously selected frameworks as standalone software.

Fuzzy sets and fuzzy logic can improve the situation, as not, all ISO 25010 criteria need to be calculated, and help to use these criteria more accurately.

To assess the quality of frameworks, fuzzy logic can be used as a coefficient to assess the quality criterion. The higher the coefficient, the more significant the criterion.

The fuzzy set algorithm presented by A. Zade in 1965 was used to calculate the quality [12]. For the mathematical definition, X is used, which is a point in space (object), with a common element, denoted by x . Thus, $X = \{x\}$. The fuzzy set (class) A in X is characterized by the membership function (characteristic) $f_A(x)$, which associates with each point x in X a real number in the interval $[0, 1]$ with the value of $f_A(x)$, where x represents the "degree membership" x in A . Thus, the closer the value of $f_A(x)$ to one, the higher the degree of membership x in A . When A is a set in the usual sense of the word, its membership function can take only two values 0 and 1. Therefore $f_A(x) = 1$ or 0, according to x does not correspond to or does not belong to A . Accordingly, in this case, $f_A(x)$ is reduced to an informed characteristic function of the set A .

Verbal assessments and their corresponding coefficients are highlighted in the table 4.

Table 4 – The metrics of criteria's importance

Verbal assessments	Coefficient
No impact	0.00
It has little effect	0.25
Average impact	0.50
The impact is more than average	0.75
Strong influence	1.00

Functional suitability is an important criterion. Testing is a complex process and requires that the testing system meet all needs, meeting all user needs. Functionality is strongly influenced, so the coefficient is equal to 1. The ease of use of the program depends on the speed of creation and launch of testing and the cost of staff training. All frameworks require the user to have a basic knowledge of programming languages. The program interface also has little effect on performance, but the frameworks under consideration always provide an interface that makes the developer's job much simpler.

Also, we can distinguish the criterion of "training requirements" and the criterion about ease of use, which have an impact above average with a factor of 0.75. Plus, an important criterion for buying products online is the security of the application, namely data privacy. Users of the system should not hesitate to fill in the fields with personal information. The coefficient of this criterion has a strong influence, so we have 1. Today nothing stands still, so online stores are constantly updated. Therefore, an essential criterion for assessing the quality of the framework is the ability to modify in the future already

Table 3 – Comparison of the functionality of Back-End frameworks for the organization of e-commerce solutions

Producer	PCM	B2C	B2B	WCMS	Mobile	Print	Call center
SAP Hybris	+	+	+	+	+	+	+
IBM	+	+	+	+	+	-	+
Oracle ATG	-	+	+	+	+	-	+
Demandware	-	+	-	-	+	-	-
Heiler	+	-	-	-	-	-	-
Magento	-	+	+	+	+	-	-

written code. This criterion has a greater than average effect with a coefficient equal to 0.75. Most developers use JIRA to develop their products, or, given that the application will be developed for e-commerce, you need the ability to integrate with different systems to pay for the order. Therefore, the possibility of integration has an average coefficient of 0.50. The web application is developed for use on a single server and is used by a large number of clients, so it does not require development for different operating systems. But sometimes servers can be updated, so portability or compatibility has little effect with a factor of 0.25. Because e-commerce applications need to do it 24/7, you need a high-performance framework. Therefore, performance has an above-average impact, and its scope is 1. The last criterion for using frameworks is its price. This criterion is not imperative, because web-applications usually offer those online stores that can afford the cost of the framework. The same coefficient has a small impact and is equal to 0.25.

We pass to the last stage of calculation of the quality of frameworks. After defining the main criteria and providing them with the appropriate coefficients, it is necessary to evaluate frameworks. Each criterion has a score from 1 to 5.

Taking into account the abbreviations with meanings were presented in table 5, with the help of expert opinion, essential evaluation criteria were selected, and verbal evaluations of all considered frameworks were compared, which was presented in table 6.

Table 5 – Meanings of abbreviations

Abbreviation	Meaning
C1	Functional suitability
C2	Requirement for training
C3	Interface
C4	Security data
C5	Modification
C6	Integration with JIRA and payment systems
C7	Compatibility
C8	Productivity
C9	Price
P1	Hybris
P2	IBM
P3	ATG
P4	Demandware
P5	Magento
P6	Heiler

Table 6 – Evaluation of frameworks

Criterion	Coefficient	P1	P2	P3	P4	P5	P6
C1	1.00	5	3	5	4	5	3
C2	0.75	3	2	3	3	4	3
C3	0.75	5	2	1	5	5	3
C4	1.00	5	5	5	5	5	5
C5	0.75	5	5	5	5	3	5
C6	0.50	4	4	3	5	4	1
C7	0.25	4	5	5	5	3	5
C8	1.00	5	4	3	2	5	5
C9	0.25	2	1	5	1	1	2

To calculate the overall quality assessment of frameworks, we should use formula 3 that was presented below:

$$Total = \frac{\sum_{i=1}^n k_i C_i}{n} \quad (3)$$

where k_i – a criterion coefficient;

C_n – a criterion;

n – total number of criteria.

The total assessment of each of the criteria was given in the table 7.

Table 7 – Overall evaluation of frameworks

The name of a framework	Final assessment
Hybris	3.13
IBM	2.47
ATG	2.63
Demandware	2.75
Magento	3.00
Heiler	2.61

In this manner, based on the data given in table 6, Hybris is the framework that meets the largest number of criteria. But keep in mind that even Hybris cannot meet all the needs of any project.

Conclusions. When evaluating frameworks, it is possible to use modern models for estimating the quality of software. It is advisable to make such an assessment when choosing a framework at the beginning of web-based software development, which will improve the quality of software development and save time.

References

- Moseley D., Baumfield V., Elliott J., Gregson M., Higgins S., Miller J., Newton D. P. *Frameworks for Thinking: A Handbook for Teaching and Learning*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 378 p.
- Clavijo D. *Web framework types*. URL: <http://blog.websitesframeworks.com/2013/02/web-frameworks-types-122> (дата звернення: 19.09.2020).
- Stanojević V., Vlajić S., Milić M., Ognjanović M. *Guidelines for framework development process*. Serbia, 2011 7th Central and Eastern European Software Engineering Conference (CEE-SECR), 2011, №12692778. P. 1–9.
- S. Bhargava., P. J. Bhatewara. *Software Engineering: Conceptualize*. New Delhi, Educreation Publishing, 2018. 147 p.
- Official site SAP Hybris*. URL: <https://www.sap.com> (дата звернення: 15.09.2020).
- Official site Cloud IBM*. URL: <https://cloud.ibm.com> (дата звернення: 15.09.2020).
- Official site Oracle*. URL: <https://www.oracle.com> (дата звернення: 15.09.2020).
- Official site Salesforce*. URL: <https://www.salesforce.com> (дата звернення: 15.09.2020).
- Official site Magento*. URL: <https://magento.com> (дата звернення: 15.09.2020).
- Сравнение e-commerce платформ для интернет-магазина*. URL: <http://novardis.com/press/vybor-sravnienie-platform-internet-magazina-hybris.html> (дата звернення: 12.10.2020).
- ISO/IEC 25010*. URL: <http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010> (дата звернення: 19.09.2020).
- Zadeh L. A. *Fuzzy Sets. Information and control*. 1965. Vol. 8. P. 255–353.

References (transliterated)

- Moseley D., Baumfield V., Elliott J., Gregson M., Higgins S., Miller J., Newton D. P. *Frameworks for Thinking: A Handbook for*

- Teaching and Learning*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 378 p.
2. Clavijo D. *Web framework types*. Available at: <http://blog.websitesframeworks.com/2013/02/web-frameworks-types-122> (accessed: 19.09.2020).
 3. Stanojević V., Vlajić S., Milić M., Ognjanović M. *Guidelines for framework development process*. Serbia, 2011 7th Central and Eastern European Software Engineering Conference (CEE-SECR), 2011, №12692778, pp. 1–9.
 4. S. Bhargava., P. J. Bhatewara. *Software Engineering: Conceptualize*. New Delphi, Educreation Publishing, 2018. 147 p.
 5. *Official site SAP Hybris*. Available at: <https://www.sap.com> (accessed 15.09.2020).
 6. *Official site Cloud IBM*. Available at: <https://cloud.ibm.com> (accessed 15.09.2020).
 7. *Official site Oracle*. Available at: <https://www.oracle.com> (accessed 15.09.2020).
 8. *Official site Salesforce*. Available at: <https://www.salesforce.com> (accessed 15.09.2020).
 9. *Official site Magento*. Available at: <https://magento.com> (accessed 15.09.2020).
 10. *Sravnienie e-commerce platform dlya internen-magazina [Comparison of e-commerce platforms for online shopping]*. Available at: <http://novardis.com/press/vybor-sravnienie-platform-internet-magazina-hybris.html> (accessed 12.10.2020).
 11. *ISO/IEC 25010*. Available at: <http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010> (accessed 19.09.2020).
 12. Zadeh L. A. *Fuzzy Sets. Information and control*. 1965, vol 8, pp. 255–353.

Надійшла (received) 31.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Селівьорстова Юлія Романівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-015X>; e-mail: julia.selivostova@gmail.com

Лютенко Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: cherliv68@gmail.com

Орехов Сергій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Селівьорстова Юлія Романовна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студентка кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-015X>; e-mail: julia.selivostova@gmail.com

Лютенко Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: cherliv68@gmail.com

Орехов Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Selivostova Yuliia Romanivna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv city, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-015X>; e-mail: julia.selivostova@gmail.com

Lutenko Iryna Victorivna – Candidate of Engineering Sciences, docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor, Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: cherliv68@gmail.com

Orekhov Sergey Valerievich – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Accosiate Professor of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

С. Ф. ЧАЛИЙ, В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА

ДЕКЛАРАТИВНО-ТЕМПОРАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Предметом дослідження є процеси побудови пояснень щодо запропонованих інтелектуальною інформаційною системою рішень. Пояснення подає в упорядкованому вигляді знання щодо результатів роботи інтелектуальної системи з урахування контексту його побудови. Мета полягає в розробці підходу до побудови опису знань для представлення пояснення, що забезпечує можливість тлумачення рішень інтелектуальної системи в онлайн-режимі, з використанням найбільш актуальних залежностей щодо стану предметної області та потреб користувача. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі: постановка узагальненої задачі формування пояснення та формування принципів її вирішення; визначення принципів побудови опису знань для пояснення; розробка підходу до побудови пояснення на основі інтеграції декларативного опису предметної області та темпорального опису процесу прийняття рішення. Запропоновано узагальнену постановку задачі формування пояснення у формі знаходження моделі тлумачення, що дає можливість мінімізувати неточність опису процесу отримання рішення відносно моделі процесу функціонування інтелектуальної системи в умовах обмежень на складність пояснення. Сформульовано принципи вирішення задачі побудови пояснення, які передбачають послідовне формування декларативного опису предметної області у вигляді відповідної онтології, а також опису процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі на основі темпоральних правил, що дає можливість адаптувати пояснення на основі формального опису змін у предметній області. Запропоновано декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснення в інтелектуальній інформаційній системі. Згідно даного підходу послідовно вирішуються задачі деталізації цілей пояснення в рамках визначеної концепції на основі використання онтології предметної області, формування пояснення з урахуванням структури інтелектуальної системи та взаємодії її складових, персоналізації пояснення у відповідності до вподобань користувача. Даний підхід дає можливість оперативно актуалізувати витлумачення, що створює умови для побудови пояснень в режимі онлайн.

Ключові слова: пояснення; знання; інтелектуальна інформаційна система; темпоральні правила; вимоги до пояснення.

С. Ф. ЧАЛЫЙ, В. А. ЛЕЩИНСКИЙ, И. А. ЛЕЩИНСКАЯ

ДЕКЛАРАТИВНО-ТЕМПОРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБЪЯСНЕНИЙ В ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Предметом исследования являются процессы построения объяснений для предложенных интеллектуальной информационной системой решений. Пояснение представляет в упорядоченном виде знания о результатах работы интеллектуальной системы с учетом контекста его построения. Цель заключается в разработке подхода к построению описания знаний для представления объяснения, обеспечивающего возможность толкования решений интеллектуальной системы в онлайн-режиме, с использованием наиболее актуальных зависимостей, отражающих состояние предметной области и потребности пользователя. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: постановка обобщенной задачи формирования объяснения и формирование принципов ее решения; определение принципов построения описания знаний для объяснения; разработка подхода к построению объяснений на основе интеграции декларативного описания предметной области и темпорального описания процесса принятия решения. Предложена обобщенная постановка задачи формирования объяснения, ориентированная на нахождение модели пояснения, которая позволяет минимизировать неточности описания процесса получения решения относительно модели процесса функционирования интеллектуальной системы в условиях ограничений на сложность объяснения. Сформулированы принципы решения задачи построения объяснения, которые предусматривают последовательное формирование декларативного описания предметной области в виде соответствующей онтологии, а также описание процесса принятия решения в интеллектуальной системе на основе темпоральных правил, дает возможность адаптировать объяснение на основе формального описания изменений в предметной области. Предложен декларативно-темпоральный подход к построению объяснений в интеллектуальной информационной системе. В соответствии с данным подходом последовательно решаются задачи детализации целей объяснения в рамках заданной концепции на основе онтологии предметной области, формирования объяснения с учетом структуры интеллектуальной системы и взаимодействия ее составляющих, персонализации объяснения в соответствии с предпочтениями пользователя. Данный подход дает возможность оперативно актуализировать пояснения, что создает условия для построения объяснений в режиме онлайн.

Ключевые слова: объяснения; знания; интеллектуальная информационная система; темпоральные правила; требования к объяснению.

S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA

DECLARATIVE-TEMPORAL APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF EXPLANATIONS IN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

The subject of the research is the processes of constructing explanations for the solutions proposed by the intelligent information system. The explanation provides in an orderly manner knowledge about the solution of the intelligent system, taking into account the context of its construction. The aim is to develop an approach to constructing a description of knowledge to provide an explanation that provides the ability to interpret intelligent system solutions online, using the most relevant dependencies on the state of the subject area and user needs. To achieve this goal, the following tasks are solved: setting a generalized problem of forming an explanation and principles for its solution; definition of principles of construction of the description of knowledge for explanation; developing an approach to constructing an explanation based on the integration of a declarative description of the subject area and a temporal description of the decision-making process. A generalized formulation of the problem of forming an explanation in the form of finding an interpretation model is proposed, which makes it possible to minimize the inaccuracy of the description of the decision-making process regarding the model of the intelligent system functioning process in the conditions of explanation complexity. The principles of solving the problem of constructing an explanation are formulated, which provide for the consistent formulation of a declarative description of the subject area in the form of an appropriate ontology, as well as a description of the decision-making process in the intellectual system based on temporal rules. A declarative-temporal approach to constructing an explanation in an intelligent information system is proposed. According to this approach, the tasks of detailing the goals of the explanation within the defined concept are consistently solved on the basis of the ontology of the subject area, the explanation is formed taking into account the structure of the intelligent system and the interaction of its components, personalization of the explanation according to user preferences. This approach makes it possible to update the interpretation, which creates the conditions for building explanations online.

Keywords: explanation; knowledge; intelligent information system; temporal rules; requirements for explanation.

Вступ. Сучасні інтелектуальні інформаційні системи вирішують неструктуровані або частково структуровані задачі з використанням складних алгоритмів. Для того, щоб така система була «прозорою» для користувача, рішення, що вона пропонує, доповнюють поясненнями [1, 2]. Пояснення мають обґрунтовувати запропоновані інтелектуальною системою результати аналогічно людині – спеціалісту у відповідній предметній області. В останні роки значну увагу приділяють властивості самопояснювання інтелектуальних систем. Рішення та процес роботи такої системи може бути безпосередньо інтерпретований користувачем [3].

Важливість пояснень пов'язана також із тим, що сучасні методи обчислювального інтелекту використовують неявні, неочевидні для користувача знання. Зокрема, в алгоритмі колаборативної фільтрації латентні фактори визначають вподобання користувача [4]. Ці фактори виявляються шляхом матричної факторизації і тому вони безпосередньо не можуть виступати в якості обґрунтування вподобань для відповідного користувача. В такому випадку необхідно сформулювати додаткове пояснення, що обґрунтовує отримане рішення для споживачів.

В цілому пояснення подає в деталізованому та упорядкованому вигляді знання щодо сформованого інтелектуальною системою рішення та контексту його побудови, підвищує ступінь довіри до цього рішення та ефективність його використання, що як наслідок, призводить до збільшення кількості користувачів такої системи.

Таким чином, проблема побудови пояснень з урахуванням знань щодо стану предметної області, структури та механізму функціонування інтелектуальної системи, а також вподобань користувача є актуальною. Вирішення цієї проблеми дає можливість спростити використання запропонованого інтелектуальною системою рішення, а також адаптувати процес його формування з урахуванням потреб користувача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підходи до побудови пояснень [1] базуються на двох ключових ідеях: використання опису внутрішнього механізму прийняття рішення в інтелектуальній системі та використання схожості процесів прийняття рішень. Перша ідея реалізує принцип білого ящика і була запропонована при розробці підходів до побудови пояснень в експертних системах [4], де вважалось, що послідовність правил логічного виводу є елементом пояснення отриманого результату [5]. Друга ідея базується на принципі чорного ящика та знайшла своє використання в системах на основі прецедентів [6], де прийняте прецедентне рішення є обґрунтуванням процесу прийняття схожих рішень у існуючій інтелектуальній системі.

Сьогодні при побудові пояснень використовується комбінація двох розглянутих підходів. Наприклад, в системах електронної комерції для пояснення використовують популярність товарів, значення рейтингів, схожість інтересів користувачів або характеристик товарів [4].

Підхід на основі чорного ящика для формування пояснень реалізується шляхом побудови баз знань, що містять можливі логічні залежності та обмеження, суттєві для прийняття рішення в інтелектуальній системі [7, 8]. Підхід до побудови пояснень з урахуванням потреб користувачів запропоновано в роботі [9].

Аналіз існуючих підходів дозволяє зробити висновок, що вони враховують структуру й властивості предметної області та інтелектуальної системи, а також інтереси користувача. Однак темпоральному аспекту, що відображає зміни інтересів користувача з часом, а також зміни у предметній області, не приділяється достатньо уваги.

Пояснення без врахування змін у предметній області може не враховувати ключових кроків з формування рішення в інтелектуальній системі. В результаті тлумачення можуть бути схожими для різних рішень, що знижує довіру користувача. З іншого боку, врахування темпорального аспекту дає можливість актуалізувати знання щодо предметної області та користувача, що є особливо важливим для прийняття рішень в онлайн-режимі [10].

Двохаспектний підхід потребує побудови комбінованого, декларативно-темпорального опису знань, що будуть використані у поясненнях. Декларативний аспект задається залежностями, що відображають послідовність дій із прийняття рішень у часі. Для відображення таких залежностей можуть бути використані темпоральні правила [11, 12] та обмеження [13], або ж темпоральні графи [14].

Метою цієї статті є розробка декларативно-темпорального підходу до опису знань щодо пояснень з урахуванням зміни цих знань з часом. Побудова опису знань для представлення пояснення має забезпечити можливість тлумачення результату інтелектуальної системи у онлайн-режимі, з використанням останніх, найбільш актуальних залежностей щодо стану предметної області та потреб користувача.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких задач:

- постановка узагальненої задачі формування пояснення та формулювання принципів її вирішення;
- визначення принципів побудови опису знань для пояснення щодо запропонованих інтелектуальною системою рішень з тим, щоб забезпечити узгодженість та актуальність вказаних знань;
- розробка підходу до побудови пояснення на основі інтеграції декларативного опису предметної області та темпорального опису процесу прийняття рішення.

Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень.

Користувач інтелектуальної системи у складі пояснення має побачити відомі йому факти а також залежності між цими фактами, що базуються на відомих та зрозумілих для користувача концепціях, структурах, алгоритмах. Наявність відомих понять, концептів та зрозумілих зв'язків між цими поняттями робить «прозорим» як саме пояснення, так і процес

прийняття рішення в інтелектуальній системі і, відповідно, сприяє підвищенню довіри користувача інтелектуальної системи.

Узагальнена модель пояснення p , що відповідає таким вимогам, належить до класу моделей P , що можуть бути безпосередньо інтерпретовані. Форма представлення залежностей та концепцій у моделях даного класу має відповідати типовим, зрозумілим для користувача, законам предметної області. Така прозора форма представлення забезпечується, наприклад, за допомогою правил «if-then», темпоральних правил, дерев рішень, з використанням лінійних моделей, тощо.

Для того, щоб пояснення відображало процес вирішення задачі в інтелектуальній системі, область визначення моделі $\text{dom } p$ має охоплювати всі різноманітні дані, що можуть бути використані для формування пояснення. Наприклад, факти, що відображають стани інтелектуальної системи або її підсистем у процесі формування рішення, дані, які використовувались елементами системи на різних етапах прийняття рішення, тощо. Тому область визначення моделі пояснення для n вхідних елементів доцільно розглядати з точки зору доступності цих елементів та задати аналогічно області визначення булевої функції: $\text{dom } p = \{0, 1\}^n$.

Інтерпретаційні можливості моделі p значною мірою залежать від її складності. Більш складна модель забезпечує побудову детальніших пояснень. Складність $O(p)$ моделей розглянутих класів може бути визначена через кількість елементів. Наприклад, через кількість правил, що були використані для побудови пояснення. Очевидно, що незначна кількість правил дає можливість побудувати спрощене і неточне пояснення. З іншого боку, збільшення розміру множини правил призводить до надлишкової деталізації і відповідних обчислювальних витрат, що ускладнює своєчасне формування пояснення. Тому складність доцільно розглядати як обмеження в задачі побудови пояснень.

Задача побудови пояснення полягає в тому, щоб підібрати таку модель p , що дає можливість мінімізувати неточність $l(p(x), m(x))$ пояснення щодо моделі функціонування інтелектуальної системи m при використанні однакових вхідних даних x за умов обмеження по складності моделі пояснення $O(p)$:

$$p' = \underset{p \in P}{\text{argmin}} l(p(x), m(x)) | O(p). \quad (1)$$

Деталізація загальної постановки задачі побудови пояснення виконується наступним чином.

По-перше, визначається клас моделей пояснень P . Клас задає типи залежностей, які будуть використані при побудові пояснення. Наприклад, каузальні залежності визначають причинно-наслідкові зв'язки між фактами, темпоральні залежності задають послідовність фактів у часі, онтології формують семантичні зв'язки між поняттями у предметній області.

По-друге, в залежності від класу P задаються обмеження на складність моделі, або допустимий

діапазон складності. В якості показника складності можуть виступати не лише кількість елементів моделі, але й кількість зв'язків між елементами, кількість рівнів ієрархії, кількість типів залежностей, тощо.

По-третє, для класу P визначається модель (або метод) обчислення неточності l , тобто ступеню невідповідності між поясненням та отриманим результатом роботи інтелектуальної системи. Для обчислення l може, наприклад, бути використаний метод KNN (найближчого сусіда).

В четвертих, визначаються можливі відмінності вхідних даних для моделей пояснення $p(x)$ та функціонування інтелектуальної системи $m(x)$. Згідно постановки (1) обидві моделі мають використовувати однакові набори вхідних даних. Однак при побудові пояснення доступ до набору вхідних даних x може бути обмеженим з комерційних міркувань, внаслідок заходів безпеки, тощо. В такому випадку використовується підмножина вхідних даних, або ж вторинні дані $v(x)$, які фіксують використання вхідних даних x в процесі роботи інтелектуальної системи. Неточність при використанні вторинних даних у поясненні має вигляд: $l(p(v(x)), m(x))$. Прикладом вторинних даних для побудови пояснень є логи (журнали подій) інтелектуальної інформаційної системи. Такі логи відображають послідовність виконання операцій з досягнення кінцевого результату і містять записи про значення заданої підмножини змінних після виконання кожної операції в інформаційній системі.

В-п'ятих, деталізована постановка задачі може бути доповнена додатковим обмеженням узгодженості даних та залежностей між цими даними. Концепція узгодженості в темпоральному аспекті полягає в тому, щоб визначити базові факти та залежності і потім узгодити з ними всі інші дані на базі реалізованої послідовності дій процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Базові факти залежать від вхідних даних процесу прийняття рішення та інформації про запити й дії користувача. Обмеження узгодженості полягає в тому, щоб довільна підмножина темпорально упорядкованого набору фактів та дій пояснювала відповідні складові переходу від вхідних даних до поточного стану інтелектуальної системи.

При вирішенні задачі побудови пояснення p' у постановці (1) пропонується використовувати такі принципи.

1) Пояснення дій з отримання результату в інтелектуальній системі має базуватись на множині відомих користувачеві фактів із визначеної предметної області; дана множина фактів відповідає концепції, згідно якої формується пояснення.

2) Пояснення має формувати упорядковану множину (послідовність) залежностей між відомими користувачу фактами та отриманими рішеннями інтелектуальної системи в рамках загальноприйнятних або спеціалізованих та відомих користувачу концепцій.

3) Множина залежностей між даними може відображати ієрархічні, функціональні, просторові, атрибутивні, а також причинно-наслідкові та темпоральні зв'язки, що описують контекст та

послідовність прийняття рішень в інтелектуальній системі.

Згідно першого принципу, для побудови пояснень необхідно сформувати онтологію предметної області, що відображає сприйняття цієї області користувачем. Наприклад, для рекомендаційних систем опис предметної області має, у відповідності із вподобаннями користувача, містити як інформацію про загальну популярність товарів або послуг, так і про їх характеристики, що є суттєвими для користувача.

Згідно другого принципу, пояснення має базуватись на загальному методі, концепції, тощо, що відображає ключові причини вибору відповідного рішення інтелектуальною інформаційною системою. Наприклад, для систем підтримки страхування в медицині використовується концепція профілактичних заходів щодо підтримки стану здоров'я користувача.

Згідно третього принципу, пояснення має забезпечити такі результати:

- показати, яким способом дії інтелектуальної інформаційної системи дають можливість досягти цілей користувача;
- деталізувати, як формується послідовність дій реалізованих дій;
- визначити, яка (або яким чином) послідовність дій із досягнення цілі буде сформована у майбутньому.

Сукупність наведених принципів створює базу для формування пояснення у вигляді узагальненої залежності між вхідними даними інтелектуальної системи та проміжним або кінцевим результатом її роботи. Тобто кожне пояснення задає ланцюжок правил, які із заданим ступенем деталізації описують послідовність переходу від вхідних даних до отриманого рішення. Такий ланцюжок може складатись із темпоральних або причинно-наслідкових залежностей f_j , які стають істинними у послідовні дискретні моменти часу t_i та є попарно узгодженими між собою у сенсі, що результат одного правила є необхідним для виконання наступного. Позначивши узгодженість залежностей f_j та f_{j+1} як $f_j \sim f_{j+1}$, отримаємо таку реалізацію пояснення, представленого моделлю p :

$$p_i = \langle f_{1j}, \dots, f_{ij}, f_{ij+1}, \dots : (\forall i) f_i \sim f_{i+1} \rangle. \quad (2)$$

Запропонований двохаспектний підхід до побудови пояснення (рис. 1) передбачає вирішення таких задач:

- деталізація цілей пояснення на основі опису структури та властивостей предметної області;
- конфігурування пояснення з урахуванням структури інтелектуальної системи та з використанням зворот.
- індивідуалізація цілей пояснення з використанням моделі користувача, яка відображає його інтереси щодо результату інтелектуальної інформаційної системи.

Перша та третя задачі використовують принцип чорного ящика при побудові пояснення, а друга – розкриває внутрішню структуру системи, тобто базується на принципі білого ящика.



Рис. 1. Послідовність фаз декларативно-темпорального підходу до побудови пояснень

Задача деталізації цілей вирішується на першій фазі даного підходу.

Деталізація цілей полягає у розкритті глобальної цілі множиною локальних цілей. Така деталізація, згідно першого принципу побудови пояснень, базується на ієрархії понять, що описують ці цілі.

Деталізація цілей, згідно другого принципу, виконується у випадку, коли пояснення не містить

відомої користувачеві концепції, або узагальненого підходу до досягнення поточної цілі. Розділення цілі дає можливість виявити пов'язані із підцілями загальні методи, що забезпечують досягнення локальних результатів. Упорядкування послідовності локальних результатів у часі згідно третього принципу дає можливість представити загальну концепцію досягнення результату як процес із послідовно досягнутих локальних цілей.

Таким чином, деталізація цілей базується на використанні онтології понять, а також додатково має враховувати темпоральну упорядкованість дій із досягнення локальних цілей в рамках визначеної концепції побудови пояснення.

На другій фазі формуються базові елементи пояснення. Такі базові елементи задають упорядкованість для довільних пар фактів. Темпоральна упорядкованість, на відміну від каузальної, дає можливість зв'язати довільні пари фактів відношенням послідовності у часі. Такі факти можуть бути істинними як послідовно у часі, так і через значні проміжки часу. В останньому випадку задаються темпоральні рамки процесу «дані-результат», які потім деталізуються проміжними, більш короткими темпоральними залежностями.

Фаза персоналізації передбачає попередню побудову декількох варіантів пояснень на основі базових залежностей, отриманих на попередній фазі. Ці темпоральні залежності упорядковуються в часі, що створює умови для задоволення обмеження узгодженості. Потім із множини можливих пояснень відбираються такі, що відповідають обмеженням користувача. Результуюче пояснення має найбільше значення показника точності згідно постановки задачі (2).

При використанні даного підходу використовується комбінація вхідних даних про предметну область, про дії користувача в інтелектуальній системі, а також про дії з прийняття рішення в ІС. Записи про послідовності дій містять темпоральну інформацію, що дає можливість сформувати відповідний аспект пояснення.

Висновки. Запропоновано узагальнену постановку задачі формування пояснення: знаходження такої моделі, що мінімізує неточність опису процесу досягнення результату відносно моделі функціонування інтелектуальної системи при заданому обмеженні на складність пояснення.

Сформульовано принципи вирішення задачі формування пояснення в узагальненій постановці, які передбачають послідовне формулювання декларативного опису предметної області у вигляді відповідної онтології, а також опису процесу прийняття рішення на основі темпоральних правил, що дає можливість адаптувати пояснення з урахуванням темпоральних змін у предметній області.

Запропоновано декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснення в інтелектуальній системі. В рамках даного підходу послідовно вирішуються задачі деталізації цілей пояснення на основі онтології предметної області, конфігурування пояснення з урахуванням структури інтелектуальної системи,

персоналізації пояснення з урахуванням вподобань користувача.

Даний підхід дає можливість актуалізувати пояснення, що створює умови для побудови пояснень в режимі онлайн.

Список літератури

- Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. David J.-M., Krivine J.-P., Simmons R. (ed) *Second generation expert systems*, Springer-Verlag. 1993. P. 543–585.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIU'07). 2007. P. 801–810.
- Arrieta A. B., Rodríguez N. A., Ser J.D., Bennetot A., Tabik S., González A. B., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins V.R., Chatila R., Herrera F. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI. *Information Fusion*, Elsevier B.V. 2019. P. 1–72.
- Aggarwal, C. C.: Recommender Systems. Springer, New York. 2017. 498 p.
- Núñez H., Angulo C., Català A. Rule-based learning systems for support vector machines. *Neural Processing Letters*. 2006. Vol. 24. P. 1–18.
- Cunningham P., Doyle D., Loughrey J. An evaluation of the usefulness of case-based reasoning explanation. *Proceedings of the International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR 2003)*. Trondheim, Springer. 2003. P. 122–130.
- Donadello I., Dragoni M., Eccher C. Persuasive explanation of reasoning inferences on dietary data. *First Workshop on Semantic Explainability ISWC 2019*. 2019. P. 1–16.
- Donadello I. Semantic image interpretation-integration of numerical data and logical knowledge for cognitive vision. *Information and Communication Technology, University of Trento*. 2018. P. 141.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об'єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Том 6, № 58. С. 97–101.
- Daher J., Brun A., Boyer A. A. A review on explanations in recommender systems. *Technical Report*. LORIA Université de Lorraine. 2017. P. 1–26.
- Levykin V., Chala O. Method of determining weights of temporal rules in markov logic network for building knowledge base in information control system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018. Vol. 5. P. 3–10.
- Levykin V., Chala O. Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5/3(95). P. 16–24.
- Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Vol. 4. P. 34–40.
- Chalyi S., Pribylnova I. The method of constructing recommendations online on the temporal dynamics of user interests using multilayer graph. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Vol. 3. P. 13–19.

References (transliterated)

- Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. David J.-M., Krivine J.-P., Simmons R. (ed) *Second generation expert systems*, Springer-Verlag. 1993, pp. 543–585.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIU'07)*. 2007, pp. 801–810.
- Arrieta A. B., Rodríguez N. A., Ser J.D., Bennetot A., Tabik S., González A. B., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins V.R., Chatila R., Herrera F. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI. *Information Fusion*, Elsevier B.V. 2019, pp. 1–72.
- Aggarwal, C. C.: Recommender Systems. Springer, New York. 2017, 498 p.

5. Núñez H., Angulo C., Català A. Rule-based learning systems for support vector machines. *Neural Processing Letters*. 2006, vol. 24, pp. 1–18.
6. Cunningham P., Doyle D., Loughrey J. An evaluation of the usefulness of case-based reasoning explanation. *Proceedings of the International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR 2003)*. Trondheim, Springer. 2003, p. 122–130.
7. Donadello I., Dragoni M., Eccher C. Persuasive explanation of reasoning inferences on dietary data. *First Workshop on Semantic Explainability ISWC 2019*. 2019, pp.1–16.
8. Donadello I. Semantic image interpretation-integration of numerical data and logical knowledge for cognitive vision. *Information and Communication Technology, University of Trento*, 2018, pp. 141.
9. Chalyi S. F., Leshchynskiy V. O., Leshchynska I. O. Modelyuvannya poyasnen shodo rekomendovanogo pereliku ob'yektiv z urahuvannyam temporalnogo aspektu vioru koristuvacha [Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice]. *Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku* [Control, Navigation and Communication Systems], 2019, vol. 6, no. 58, pp. 97–101.
10. Daher J, Brun A., Boyer A. A. A review on explanations in recommender systems. *Technical Report*. LORIA Université de Lorraine. 2017, pp. 26.
11. Levykin V., Chala O. Method of determining weights of temporal rules in markov logic network for building knowledge base in information control system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018, vol. 5, pp. 3–10.
12. Levykin V., Chala O. Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 5/3(95), pp. 16–24.
13. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, vol. 4, pp. 34–40.
14. Chalyi S., Pribylnova I. The method of constructing recommendations online on the temporal dynamics of user interests using multilayer graph. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, vol. 3, pp. 13–19.

Надійшла (received) 21.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Лецинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua

Лецинська Ірина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

Чалий Сергій Федорович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Лецинский Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua

Лецинская Ирина Александровна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

Chalyi Serhii Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Leshchynskiy Volodymyr Oleksandrovich – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua

Leshchynska Irina Oleksandrivna – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

С. Ф. ЧАЛИЙ, Є. О. БОГАТОВ

ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ПРОТОТИПУ БІЗНЕС-ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ЖУРНАЛУ ПОДІЙ

Предметом дослідження є процеси побудови моделей прототипів бізнес-процесів «AS–IS», що відображають поточну діяльність підприємства. Для побудови моделі «AS–IS» використовуються журнали подій, що містять запис реалізованих при функціонуванні підприємства операцій із мітками часу. Побудова процесної моделі «AS–IS» в використанні логів виконується засобами інтелектуального аналізу процесів. Результуюча модель прототипу бізнес-процесу має вигляд графу, що відображає всі відомі із журналу подій його реалізації. Метою роботи є підвищення ефективності впровадження процесного управління шляхом розробки технології побудови моделей прототипів процесу «AS–IS» в умовах неупорядкованих по бізнес-процесам та помилкових вхідних даних. Для досягнення поставленої мети в статті вирішуються такі задачі: розробка технології формування моделей прототипів бізнес-процесів; експериментальна перевірка технології. Отримано наступні результати. Розроблено технологію автоматизованої побудови прототипів моделей бізнес-процесів «AS–IS», яка містить у собі етапи структуризації журналів подій у процесно-орієнтовану форму і подальшої побудови моделей бізнес-процесів методами інтелектуального аналізу процесів. Розроблена технологія дозволяє отримати графову модель прототипу бізнес-процесу, яка використовується при впровадженні процесного управління в рамках першого та другого рівнів процесної зрілості. На базі отриманої моделі «AS–IS» формується удосконалена процесна модель «TO–BE». Проведена експериментальна перевірка показала, що розроблена технологія забезпечує побудову процесно-орієнтованого лога та подальше формування моделі прототипу бізнес-процесу, що відображає поточну діяльність підприємства.

Ключові слова: бізнес-процес, лог, модель «AS–IS», інтелектуальний аналіз процесів, process mining.

С. Ф. ЧАЛИЙ, Е. О. БОГАТОВ

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОТОТИПА БИЗНЕС-ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЖУРНАЛОВ СОБЫТИЙ

Предметом исследования являются процессы построения моделей прототипов бизнес-процессов «AS–IS», отражающие текущую деятельность предприятия. Для построения модели «AS–IS» используются журналы событий, содержащие записи реализованных при функционировании предприятия операций с метками времени. Построение процессной модели «AS–IS» с использованием логов выполняется средствами интеллектуального анализа процессов. Результирующая модель прототипа бизнес-процесса имеет вид графа, отражающий все известные из журнала событий его реализации. Целью работы является повышение эффективности внедрения процессного управления путем разработки технологии построения моделей прототипов процесса «AS–IS» в условиях неупорядоченных по бизнес-процессам и ошибочных входных данных. Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи: разработка технологии формирования моделей прототипов бизнес-процессов; экспериментальная проверка технологии. Получены следующие результаты. Разработана технология автоматизированного построения прототипов моделей бизнес-процессов «AS–IS», которая включает в себя этапы структуризации журналов событий в процессно-ориентированную форму и дальнейшего построения моделей бизнес-процессов методами интеллектуального анализа процессов. Разработанная технология позволяет получить графовую модель прототипа бизнес-процесса, которая используется при внедрении процессного управления в рамках первого и второго уровней процессной зрелости. На базе полученной модели «AS–IS» формируется усовершенствованная процессная модель «TO–BE». Проведенная экспериментальная проверка показала, что разработанная технология обеспечивает построение процессно-ориентированного лога и дальнейшее формирование модели прототипа бизнес-процесса, которая отражает текущую деятельность предприятия.

Ключевые слова: бизнес-процесс, лог, модель «AS–IS», интеллектуальный анализ процессов, process mining.

S. CHALYI, I. BOGATOV

TECHNOLOGY OF AUTOMATED CONSTRUCTION OF A BUSINESS PROCESS PROTOTYPE MODEL BASED ON PRE-PROCESSING OF EVENT LOGS

The subject of the study are the processes of building models of prototypes of business processes "AS–IS", reflecting the current activities of the enterprise. To build the "AS–IS" model, event logs are used, which contain a record of operations with timestamps implemented during the operation of the enterprise. Construction of the process model "AS–IS" in the use of logs is performed by means of intellectual analysis of processes. The resulting model of the prototype of the business process has the form of a graph showing all known from the log of events of its implementation. The aim of the work is to increase the efficiency of process control implementation by developing the technology of building prototype models of the process "AS–IS" in the conditions of disordered business processes and erroneous input data. To achieve this goal, the article solves the following tasks: development of technology for modeling business process prototypes; experimental verification of technology. The following results were obtained. The technology of automated prototyping of business process models "AS–IS" has been developed, which includes the stages of structuring event logs in a process-oriented form and further construction of business process models by methods of intellectual analysis of processes. The developed technology allows to obtain a graph model of a business process prototype, which is used in the implementation of process management within the first and second levels of process maturity. On the basis of the received model "AS–IS" the improved process model "TO–BE" is formed. The experimental test showed that the developed technology provides the construction of a process-oriented log and the subsequent formation of a prototype model of a business process that reflects the current activities of the enterprise.

Keywords: business process, log, "AS–IS" model, process analysis, process mining.

Вступ. Цикл функціонування сучасних підприємств передбачає постійний розвиток та покращення існуючих бізнес-процесів [1, 2]. Для вирішення цієї задачі необхідно від моделей існуючих бізнес-процесів «AS–IS» перейти до цільових процесних моделей «TO–

BE» [3, 4]. Модель «TO–BE» створюється з урахуванням поточного стану ринку, аналізу стану конкурентів та бажань кінцевих споживачів продукту або послуги, що випускається на підприємстві. Модель «AS–IS» має базуватися на даних, що відображають поточну

діяльність підприємства. У якості таких даних використовуються журнали подій (логи), що містять запис реалізованих при виконанні бізнес-процесів дій. Побудова процесної моделі «AS–IS» в використанні логів виконується засобами process mining – інтелектуального аналізу процесів (ІАП) [5, 6]. В результаті застосування цих методів бізнес-аналітик має змогу отримати графову модель, що відображає послідовність дій бізнес-процесу. Дана модель не містить умов переходів між діями і тому визначає прототип бізнес-процесу. У подальшому модель може бути уточнена на основі опитування експертів та виконавців.

Існує певний перелік вимог до логів подій інформаційних систем, що можуть бути оброблені засобами ІАП. До таких обмежень відносять: групування подій за екземплярами процесів; упорядкування подій екземпляру процесу за часом виникнення. Додатково може задаватись перелік обов'язкових та опціональних атрибутів опису подій.

Значна частина логів, в особливості логи функціонально-орієнтованих інформаційних систем, не відповідають наведеним вимогам. В таких логах не визначено належність подій до процесів. Тому перетворення таких логів у процесну форму з метою побудови прототипів бізнес-процесів «AS–IS» є актуальною задачею.

Вирішення цієї задачі базується на можливості трансформації логів до формату, необхідного для роботи засобів ІАП за рахунок аналізу додаткової інформації, що представлена атрибутами подій. Зазвичай атрибути або групи атрибутів характеризують окремі кроки із вирішення функціональних задач, що виконуються на підприємстві. Послідовності виконаних функцій визначають потоки робіт підприємства, що призводять до створення кінцевого продукту, аналогічно бізнес-процесам. Головна відмінність таких логів полягає у невідповідності між записами та послідовностями робіт, тобто неупорядкованості записів в рамках процесу створення кінцевого продукту. Події ж бізнес-процесів зазвичай упорядковані в рамках однієї траси, що фіксує виконання одного екземпляру бізнес-процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі підходи до побудови графових моделей бізнес-процесів [5–8] накладають додаткові вимоги до вхідних даних: незначна кількість помилкових даних; наявність наскрізного процесу або послідовності подій; відсутність паралельного виконання великої кількості процесів. Такі вимоги які не завжди задовольняються в логах реальних, зокрема функціонально-орієнтованих, інформаційних систем.

У роботах [9–11] було запропоновано моделі структурованого та неструктурованого логів, а також запропоновано методи структуризації логів, які відрізняються за вимогою до вхідних даних та знань. Інтеграція результатів цих робіт в єдину послідовність дій дає можливість побудувати технологію автоматизованої побудови прототипів бізнес-процесів «AS–IS».

Метою цієї статті є підвищення ефективності впровадження процесного управління шляхом розробки технології побудови моделей прототипів процесу

«AS–IS» в умовах неупорядкованих по процесам та помилкових вхідних даних.

Для досягнення поставленої мети в статті вирішуються такі задачі:

- розробка технології формування моделей прототипів бізнес-процесів;
- експериментальна перевірка технології.

Технологія побудови моделі прототипу бізнес-процесу.

Розроблена технологія інтегрує методи структуризації журналів подій, що були запропоновані в роботах [6, 7].

Головна ідея даної технології полягає у попередньому упорядкуванні подій за приналежністю до певного потоку робіт на основі порівняння атрибутів цих подій. Після аналізу атрибутів подій формуються вхідні дані до запропонованих методів трансформації лога для його перетворення у форму, придатну для обробки засобами ІАП. Переструктуровані логи передаються на вхід засобам ІАП з метою побудови моделей бізнес-процесів «AS–IS». В якості платформи ІАП було використано програмний засіб ProM.

Запропонована технологія містить у собі такі етапи.

Етап 1. Підготовка вхідного лога.

Етап 2. Аналіз атрибутів вхідного журналу подій.

Етап 3. Формування процесно-орієнтованого журналу подій.

Етап 4. Побудова моделі процесу «AS–IS» методами інтелектуального аналізу процесів.

На першому етапі перевіряється можливість побудови процесної моделі із журналу подій інформаційної системи. Умова побудови моделі – наявність мінімальної кількості атрибутів події, що задають опис дій з вирішення функціональних задач. До таких атрибутів відносять: час настання події, виконавець та ідентифікатор події лога. При подальшому аналізі до значного покращення кінцевих результатів призводить наявність множини додаткових атрибутів подій визначеної у даній предметній області. Приклад опису такої події наведено на рис. 1.

```
<event>
  <string key="org:group" value="M8"/>
  <string key="resource country" value="Sweden"/>
  <string key="organization country" value="se"/>
  <string key="org:resource" value="Johanna"/>
  <string key="organization involved" value="Org line C"/>
  <string key="org:role" value="V3_2"/>
  <string key="concept:name" value="Accepted"/>
  <string key="impact" value="Low"/>
  <string key="product" value="PROD262"/>
  <string key="lifecycle:transition" value="Wait - User"/>
  <date key="time:timestamp" value="2012-04-23T09:48:24+02:00"/>
</event>
```

Рис. 1. Приклад опису події лога

Після успішної перевірки виконується фільтрація існуючого журналу подій з урахуванням додаткових (зокрема, експертних) знань про процеси на підприємстві. Фільтрація подій виконується за такими атрибутами: час виконання; виконавці; підрозділ, тощо. Даний етап дає можливість на основі контекстної інформації виключити події, що не мають відношення до виробничих процесів підприємства та не можуть бути

використані для побудови моделі бізнес-процесу. Прикладом таких невиробничих подій може бути подія, що описує діяльність бухгалтерії при розрахунку зарплатні співробітника. Включення таких подій у вхідний набір лише призводить до формування «спагеті-подібного» графу моделі бізнес-процесу [5]. Даний граф містить надлишкову множину дуг та вершин, що не дає можливості виявити ключові причинно-наслідкові зв'язки між діями бізнес-процесу. Тому спагеті-подібну модель важко трансформувати у модель бізнес-процесу «ТО–ВЕ».

На другому етапі виконується аналіз отриманого журналу подій. Результатом аналізу є числова оцінка важливості кожного з атрибутів події журналу, а також оцінка зв'язків між атрибутами. Оцінка важливості атрибутів базується на частоті їх використання з урахуванням діапазону можливих значень цих атрибутів. Ця оцінка виконується у два кроки. Першим кроком розраховуються ваги для кожного атрибуту окремо з метою виявлення атрибутів з критично малою або великою кількістю припустимих значень атрибуту. Ці атрибути виключаються з подальшого аналізу як такі, що не дозволяють визначити приналежність події до певної траси. На другому кроці формуються множини подій з атрибутів, що не були виключені на першому кроці. Після чого розрахунок оцінки повторюється для визначених множин. Оцінка множин атрибутів дозволяє виявити перелік атрибутів, котрі дозволять віднести подію до певної траси. Оцінка зв'язків між атрибутами визначається на основі аналізу всіх припустимих значень атрибутів для певної множини атрибутів та може доповнюватися знаннями, що були надані експертами. Отримані оцінки використовуються на наступному етапі технології і є вхідними даними для методів структуризації логів подій.

На третьому етапі технології виконується структуризація подій з метою побудови процесно-орієнтованого лога. Для цього використовується методи структуризації журналів подій. Метод побудови атрибутивного опису бізнес-процесу [9] дозволяє отримати попереднє групування подій за приналежністю до певного потоку робіт. На вхід методу подається отримана на попередньому етапі таблиця ваг атрибутів. Проведена низка експериментів доводить, що цей метод є швидшим за існуючі аналогічні методи і є достатньо ефективним за умови, що існує достатня кількість додаткових атрибутів предметної області. У разі відсутності останніх, а також для уточнення результатів, отриманих цим методом, можливе додаткове використання методу структуривання лога, котрий базується на інваріантах подій [10]. Інваріанти подій визначаються за рахунок аналізу зміни значень послідовності подій, що виконується на попередньому етапі технології, або шляхом опитування експертів.

Четвертий етап передбачає побудову моделей «AS–IS» шляхом аналізу структурованих логів методами process mining. Для цього передбачено використання існуючого відкритого програмного додатку ProM 6.0. На виході з програмного додатку користувач отримує готову модель прототипу бізнес-процесу «AS–IS», що побудована згідно з заданою нотацією. Нотація

і алгоритм, що використовуються для аналізу лога, обираються безпосередньо користувачем під час використання додатку.

Експериментальна перевірка технології побудови моделі прототипу бізнес-процесу.

Під час проведення експериментальної перевірки було використано реальний лог, що є у вільному доступі в базі логів процесно-орієнтованих систем [12]. З метою приведення лога до структури, характерної для функціонально-орієнтованих систем, з нього було видалено всі ідентифікатори трас, а події було впорядковано за міткою часу. У результаті було отримано лог з однією трасою та 65 тисячами подій. Згідно вимог першого етапу технології, кожна подія лога була верифікована на наявність обов'язкових атрибутів подій. Фільтрація подій після верифікації не проводилася, внаслідок відсутності обмежень щодо припустимих значень атрибутів. Всі події було збережено у «*.xes» форматі.

На другому етапі в результаті аналізу мета-даних було виконано перший з кроків оцінки ваг атрибутів – оцінка важливості атрибутів окремо один від одного. Отримана результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Оцінка ваг кожного з атрибутів події лога

Атрибути подій	Вага атрибуту події	Кількість значень припустимих атрибутів
"org:group"	0.004846153846	315
"organization involved"	0.000307692308	20
"org:role"	0.000307692308	20
"concept:name"	0.000076923077	3
"impact"	0.000046153846	3
"product"	0.002353846154	153
"lifecycle: transition"	0.000076923077	5
"org:resource"	0.009338461538	607

З таблиці 1 видно, що повторення значення "concept:name" відбувається у кожній третій події. Урахування цього атрибуту, як значущого, може призвести до розділення лога на три траси довжиною більш ніж 20 тисяч подій кожна. Такі атрибути виключаються з подальшого розрахунку ваг для множин подій.

В результаті виконання другого етапу з подальшого аналізу було вилучено наступні атрибути: "concept:name"; "impact"; "lifecycle: transition"; "org:role"; "organization involved".

На другому кроці даного етапу були отримані оцінки ваг атрибутів, що залишилися. Результати виконання даного кроку наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Оцінка ваг для множин атрибутів події лога

Множина атрибутів	Кількість можливих значень	Розрахунок ваг на набору атрибутів
["org:resource", "product"]	1393	0.021430769
["org:group", "org:resource"]	1854	0.028523077
["org:group", "org:role", "product"]	626	0.009630769
["org:group", "org:resource", "product"]	2415	0.037153846
["org:group", "org:resource", "org:role", "product"]	2415	0.037153846
["org:group", "org:resource", "organization involved", "org:role", "product"]	2415	0.037153846

З таблиці 2 видно, що існують групові атрибути, що змінюються попарно. Прикладом таких атрибутів є "org:group", "org:role".

Тому при подальшому аналізі достатньо використовувати лише один атрибут з групи з метою оптимізації розрахунків, при цьому кінцевий результат аналізу не зміниться. В наслідок виконання другого етапу визначено наступні ваги атрибутів:

- "org:resource" – 0.14504727;
- "org:group" – 0.27950378;
- "product" – 0.57544896.

За результатами оцінки зв'язків між атрибутами було визначено наступні інваріанти:

- «Якщо значення атрибуту "product" є рівними для обох подій – події слід вважати за події однієї траси»;
- «Початковими вважаються події значення атрибуту «concept:name» яких рівно одному зі значень: «Queued», «Accepted»»;
- «Кінцевими вважаються події для котрих значення атрибуту «concept:name» є «Completed», а значення атрибуту «lifecycle:transition» є «Canceled»».

На третьому етапі першим було використано алгоритм, що базується на порівнянні атрибутів, після чого отримані результати було уточнено за рахунок використання методу, що базується на використанні інваріантів подій.

На четвертому етапі структуровані логи було передано на вхід програмному додатку ProM 6.8 з метою побудови моделей «AS-IS». Для цього було використано наступні алгоритми інтелектуального аналізу бізнес-процесів:

- альфа-алгоритм ++;
- евристичний алгоритм;
- фаззі-алгоритм.

Результати формування моделей «AS-IS» для структурованих логів наведено на рис. 2–7.

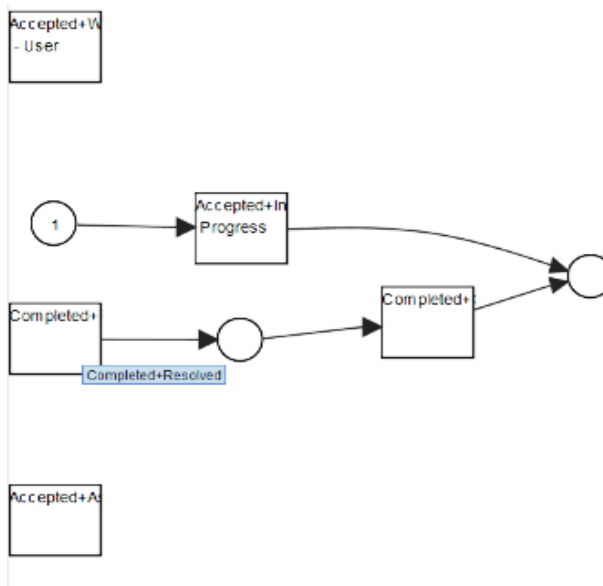


Рис. 2. Приклад використання покращеного альфа-алгоритму до лога отриманого, структурованого методом порівняння атрибутів

На рисунках 8–10 для порівняння наведено моделі «AS-IS», що отримані з використанням тих же алгоритмів ІАП для неструктурованих логів, що були отримані на початку експерименту шляхом видалення ідентифікаторів трас.

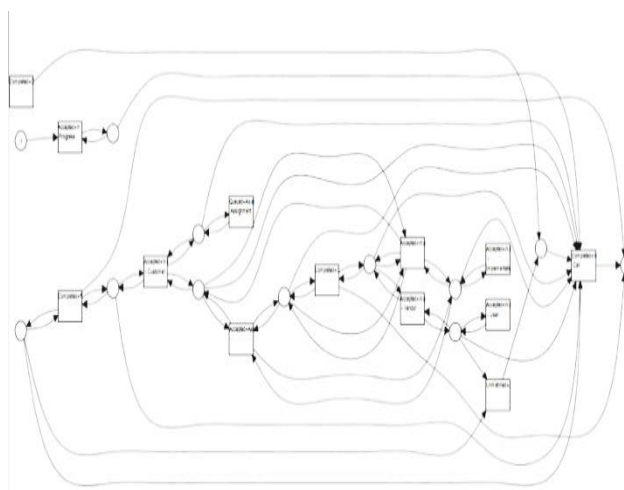


Рис. 3. Приклад використання покращеного альфа-алгоритму для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних лога, структурованого з використанням інваріантів подій

Порівняння моделей прототипів бізнес-процесів показує, що використання методу інваріантів дозволяє виявити додаткові вершини та зв'язки.

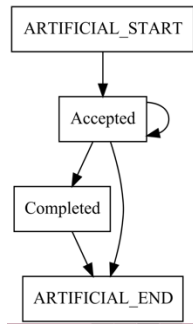


Рис. 4. Приклад використання евристичного алгоритму для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних лога, структурованого методом порівняння атрибутів

Таким чином, модель «AS-IS», яка отримана на основі аналізу лога, сформованою методом порівняння атрибутів, була додатково уточнена за рахунок використання методу, що використовує інваріанти подій.

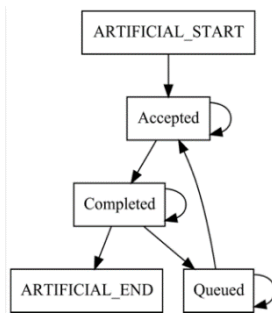


Рис. 5. Приклад використання евристичного алгоритму для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних лога, структурованого з використанням інваріантів подій

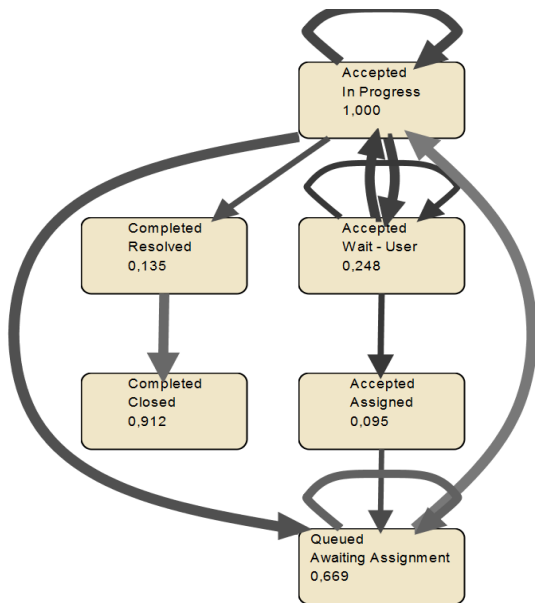


Рис. 6. Приклад використання алгоритму нечіткого пошуку для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних лога, структурованого методом порівняння атрибутів

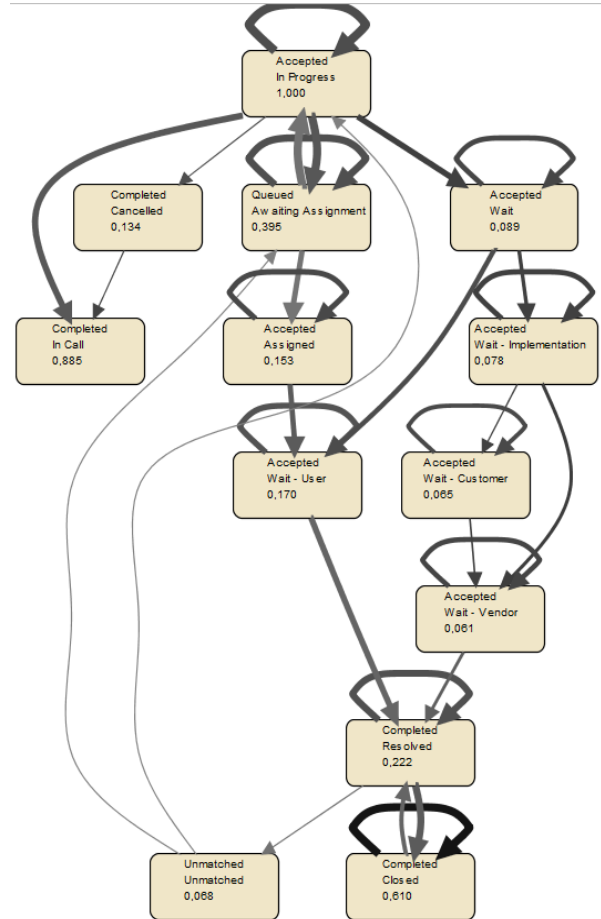


Рис. 7. Приклад використання алгоритму нечіткого пошуку для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних лога, структурованого з використанням інваріантів подій

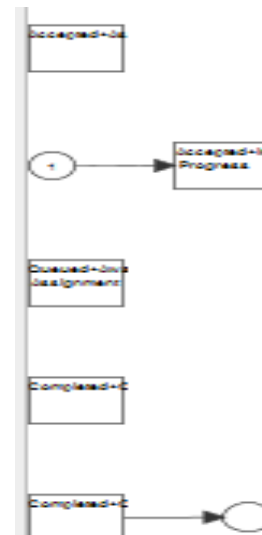


Рис. 8. Приклад використання покращеного альфа-алгоритму для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних неструктурованого лога.

Порівняння моделей свідчить про важливість попередньої структуризації подій

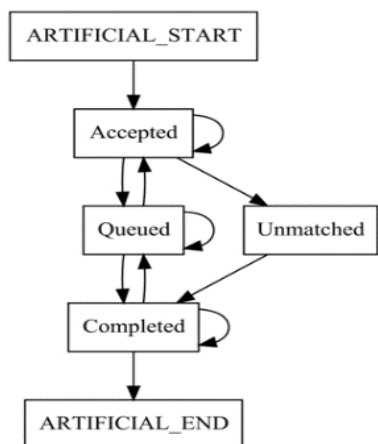


Рис. 9. Приклад використання евристичного алгоритму для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних неструктурованого лога

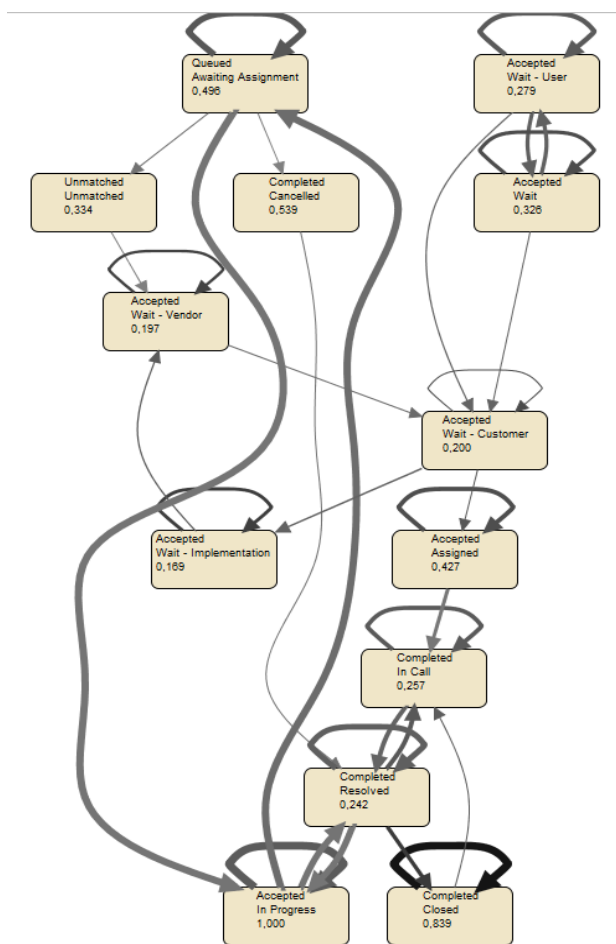


Рис. 10. Приклад використання алгоритму нечіткого пошуку для побудови моделі прототипу бізнес-процесу із даних структурованого лога

Згідно технологією ІАП, кінцеві моделі «AS-IS» можуть бути оцінені за наступними показниками: точність; гнучкість; узагальненість; простота [5].

Хоча перераховані критерії є суперечливими, вважається що адекватна модель має бути збалансована відносно кожного з них [5]. Так, моделі отримані з

використанням інваріантів є найбільш адекватними у порівнянні з усіма іншими моделями: вони є більш точними ніж моделі отримані за рахунок порівняння атрибутів, та більш гнучкими, узагальненими і простими у порівнянні з моделями що було сформовано на базі неструктурованого лога.

Висновки. Розроблено технологію автоматизованої побудови прототипів моделей бізнес-процесів «AS-IS», яка містить у собі етапи переструктуризації журналів подій у процесно-орієнтовану форму і подальшу побудову моделей бізнес-процесів методами process mining, що дає можливість сформувати графову модель прототипу бізнес-процесу при впровадженні процесного управління в рамках першого та другого рівнів процесної зрілості і, таким чином, забезпечити можливість удосконалення бізнес-процесів на основі формування моделі «TO-BE».

Проведена експериментальна перевірка показала, що розроблена технологія забезпечує побудову процесно-орієнтованого лога та подальше формування моделі прототипу бізнес-процесу «AS-IS».

Список літератури

1. Van Der Aalst W. M. P. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. P. 1– 37.
2. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 403 p.
3. Siska L. The concept of management control system and its relation to performance measurement. *The 16th Annual conference on finance and accounting (ACFA)*. 2015. Vol. 25. P. 141–147.
4. Репин В.В. *Бизнес-процессы. Моделирование, внедрение, управление*. Манн, Иванов и Фербер, 2013. 512 с.
5. Van Der Aalst W. M. P. *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin: Springer-Verlag, 2016. 467 p.
6. 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.
7. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. *Fundamentals of business process management*. Springer, 2013. 391 p.
8. Brocke J., Rosemann M. *Handbook on business process management*. Berlin: Springer-Verlag, 2015. 709 p.
9. Chalyi S. Bogatov I. Method of constructing an attribute description of the business process «as is» in the process approach to enterprise management. *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, 2018. P. 63–72.
10. Чалий С. Ф., Богатов С.О., Прибильнова І.Б. Методи формування упорядкованих по процесам трас журналу подій в задачах процесного управління. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології, 2018. № 21 (1297). С. 43–47.
11. Chalyi S., Levykin I., Biziuk A., Vovk A., Bogatov I. Development of the technology for changing the sequence of access to shared resources of business processes for process management support. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol 2, № 3 (104). P. 22–29.
12. Steeman W. VINST information needed to understand the dataset. *Volvo IT*, 2012. 12 p.

References (transliterated)

1. Van Der Aalst W. M. P. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. pp. 1–37.
2. Weske M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 403 p.
3. Siska L. The concept of management control system and its relation to performance measurement. *The 16th Annual conference on finance and accounting (ACFA)*. 2015, vol. 25, pp. 141–147.

4. Repin V.V. *Biznes-processy. Modelirovanie, vnedrenie, upravlenie* [Business processes. Modeling, implementation, management]. Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2013. 512 p.
5. Van Der Aalst W. M. P. *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2016. 467 p.
6. 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.
7. Dumas M., Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. *Fundamentals of business process management*. Springer Publ., 2013. 391 p.
8. Brocke J., Rosemann M. *Handbook on business process management*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2015. 709 p.
9. Chalyi S. Bogatov I. Method of constructing an attribute description of the business process «as is» in the process approach to enterprise management. *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, 2018, pp. 63–72.
10. Chalyi S. F., Bogatov I.O., Pribylnova I.B. Metodi formuvannya uporyadkovanih po procesam tras zhurnalu podij v zadachah procesnogo upravlinnya [Techniques of reordering traces in the event logs in business process management tasks]. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «Harkivskij politekhnicheskij institut». Seriya: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. System analysis, control and information technology], 2018, № 21 (1297), pp. 43–47.
11. Chalyi S., Levykin I., Biziuk A., Vovk A., Bogatov I. Development of the technology for changing the sequence of access to shared resources of business processes for process management support. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, vol 2, № 3 (104), pp. 22–29.
12. Steeman W. VINST information needed to understand the dataset. *Volvo IT*, 2012. 12 p.

Hadziusha (received) 21.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Богатов Євген Олегович (Богатов Евгений Олегович, Bogatov Ievgen Olegovich) – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0741-7242>; e-mail: bogatovevgeniy@gmail.com.

Чалий Сергій Федорович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Богатов Евгений Олегович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ассистент кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0741-7242>; e-mail: bogatovevgeniy@gmail.com.

Chalyi Serhii Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Bogatov Ievgen Olegovich – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant of Department of Information Control System, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0741-7242>; e-mail: bogatovevgeniy@gmail.com.

УДК 004.9+519.85

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.11

О. М. НИКУЛІНА, В. П. СЕВЕРИН, Н. В. КОЦЮБА

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Розроблена структура інформаційної технології оптимізації складних динамічних систем. Структура включає блок моделей систем, модуль методів інтегрування, блок обчислення критеріїв якості систем, блок методів оптимізації, модуль структур даних та блок подання інформації. Представлена функціональна модель інформаційної технології. У блоці моделей систем знаходяться моделі динамічних систем – об'єктів управління, регуляторів, інформаційних управляючих систем. Це дозволяє моделювати інформаційні управляючі системи енергоблоків АЕС, систему управління квадрокоптером, генератори електричних імпульсів та інші динамічні системи. У модулі методів інтегрування зібрані методи інтегрування систем диференціальних рівнянь: метод матричної експоненти для інтегрування лінійних систем, системні методи для інтегрування нелінійних систем, інші методи. У блоці обчислення критеріїв якості систем створені програми для обчислення різних критеріїв інформаційних управляючих систем: стійкості процесів управління, ідентифікації параметрів, прямих показників якості систем, інтегральних квадратичних оцінок. Розроблено блок методів оптимізації. Цей блок містить модулі методів одновимірного пошуку, багатовимірної безумовної оптимізації, глобального пошуку, генетичних алгоритмів, мінімізації суми квадратів, умовної оптимізації, векторної оптимізації. Для тестування методів створені модулі тестових функцій. Ці модулі включають тестові функції, їх бази даних та програми тестування. Розроблено модуль загальних структур даних. Запропоновані глобальні структури даних – структура постійних даних задач і методів

© О. М. Нікуліна, В. П. Северин, Н. В. Коцюба, 2020

оптимізації, структура змінних параметрів стану процесу оптимізації та структура функцій для узгодження взаємодії методів оптимізації. Блок подання інформації розв'язання задач дозволяє подавати процес оптимізації у вигляді таблиць і графіків.

Ключові слова: інформаційна технологія, динамічна система, складна система, інформаційна управляюча система, математична модель, показник якості, метод оптимізації, процес оптимізації.

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

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Разработана структура информационной технологии оптимизации сложных динамических систем. Структура включает блок моделей систем, модуль методов интегрирования, блок вычисления критериев качества систем, блок методов оптимизации, модуль структур данных и блок представления информации. Представлена функциональная модель информационной технологии. В блоке моделей систем находятся модели динамических систем – объектов управления, регуляторов, информационных управляющих систем. Это позволяет моделировать информационные управляющие системы энергоблоков АЭС, систему управления квадрокоптера, генераторы электрических импульсов и другие динамические системы. В модуле методов интегрирования собраны методы интегрирования систем дифференциальных уравнений: метод матричной экспоненты для интегрирования линейных систем, системные методы для интегрирования нелинейных систем, другие методы. В блоке вычисления критериев качества систем созданы программы для вычисления различных критериев информационных управляющих систем: устойчивости процессов управления, идентификации параметров, прямых показателей качества систем, интегральных квадратичных оценок. Разработан блок методов оптимизации. Этот блок содержит модули методов одномерного поиска, многомерной безусловной оптимизации, глобального поиска, генетических алгоритмов, минимизации суммы квадратов, условной оптимизации, векторной оптимизации. Для тестирования методов созданы модули тестовых функций. Эти модули включают тестовые функции, их базы данных и программы тестирования. Разработан модуль общих структур данных для уменьшения количества формальных параметров подпрограмм, повышения надежности и согласования информационной технологии при ее работе и развитии. Предложены глобальные структуры данных – структура постоянных данных задач и методов оптимизации, структура переменных параметров состояния процесса оптимизации и структура функций для согласования взаимодействия методов оптимизации. Блок представления информации решения задач позволяет представлять процесс оптимизации в виде таблиц и графиков.

Ключевые слова: информационная технология, динамическая система, сложная система, информационная управляющая система, математическая модель, показатель качества, метод оптимизации, процесс оптимизации.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, N. V. KOTSUBA

DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR OPTIMIZING THE CONTROL OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

The structure of information technology optimization of complex dynamic systems is developed. The structure includes a block of systems models, a module of integration methods, a block for calculating system quality criteria, a block of optimization methods, a module of data structures and a block for presenting information. A functional model of information technology is presented. The block of systems models contains models of dynamic systems – control objects, regulators, information control systems. This makes it possible to simulate information control systems of NPP power units, a quadcopter control system, generators of electrical impulses and other dynamic systems. In the module of integration methods, methods for integrating systems of differential equations are collected: the matrix exponential method for integrating linear systems, system methods for integrating nonlinear systems, and other methods. In the block for calculating system quality criteria, programs have been created for calculating various criteria for information control systems: stability of control processes, identification of parameters, direct indexes of the quality of systems, integral quadratic estimates. The block of optimization methods has been developed. This block contains modules of methods of one-dimensional search, multivariate unconditional optimization, global search, genetic algorithms, sum of squares minimization, conditional optimization, vector optimization. To test methods, test function modules are created. These modules include test functions, their databases and testing programs. A module of common data structures has been developed. Global data structures are proposed – the structure of constant data of optimization problems and methods, the structure of the state variables of the optimization process and the structure of functions to coordinate the interaction of optimization methods. The block for presenting information for solving problems allows the optimization process to be presented in the form of tables and graphs.

Keywords: information technology, dynamic system, complex system, information control system, mathematical model, quality index, optimization method, optimization process.

Вступ. В теперішній час існує багато складних динамічних систем (СДС), управління якими вимагає використання інформаційних технологій (ІТ) для створення або удосконалення спеціалізованих інформаційних управляючих систем (ІУС) [1–3]. Типовим прикладом ІУС СДС є ІУС найпотужнішого в Україні енергоблоку АЕС з ядерним реактором ВВЕР-1000, що складається з багатьох локальних ІУС та потребує модернізації шляхом оптимізації показників якості процесів управління [4]. Аналогічні вимоги виникають і для ІУС багатьох СДС у різних технічних галузях [2, 3].

ІТ оптимізації управління СДС розвинені недостатньо, що потребує подальшої розробки таких ІТ [1, 2]. Аналіз проблем управління СДС показує, що невирішеною актуальною проблемою є розробка методів та моделей оптимізації управління СДС, які характеризуються великим обсягом необхідної для їх описання інформації, високим порядком і великою кількістю параметрів та нелінійностей, що потребує створення ІТ оптимізації складних ІУС [5, 6]. ІТ оптимізації управління СДС на етапі їх проектування

повинна реалізовувати можливості моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем (ДС), аналізу і синтезу таких систем, їх оптимізації за різними критеріями якості [7]. Огляд показників якості ІУС показує, що найбільш ефективними показниками для ІУС СДС є прямі показники якості (ППЯ) та поліпшені інтегральні квадратичні оцінки (ІКО), однак питання їх формування, обчислення та застосування для оптимізації ІУС розроблені недостатньо [8, 9]. Проведений огляд методів безумовної, умовної та багатокритеріальної оптимізації показує, що не достатньо розвинені методи синтезу оптимальних ІУС за ППЯ і покращеними ІКО, які дозволяють ефективно розв'язувати такі задачі оптимізації показників якості ІУС, де функції обмежень і цільова функція обчислюються в єдиному обчислювальному процесі та мають обмежені області визначення в просторі варійованих параметрів [10–12].

Мета даної статті полягає в розробці структури та елементів інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами.

Структура інформаційної технології. Загальна структура ІТ оптимізації СДС представлена на рис. 1 і включає шість основних функціональних елементів: блок моделей систем (БМС), модуль методів інтегрування (ММІ), блок обчислення критеріїв якості систем (БОКЯС), блок методів оптимізації (БМО), модуль структур даних (МСД) та блок подання інформації (БПІ). Модулі представляють сукупність взаємопов'язаних програм для виконання відповідних функцій ІТ, а блоки – сукупність модулів для виконання більш складних функцій. БМС призначений для завдання параметрів моделей ІУС, відповідних систем диференціальних рівнянь (СДР) та передавальних функцій (ПФ). ММІ призначений для розв'язання СДР різними методами інтегрування.

БОКЯС призначений для обчислення різних критеріїв якості ІУС на основі їх моделей у вигляді СДР або ПФ. Цей модуль включає програми критеріїв стійкості ІУС, критеріїв ідентифікації, методів обчислення ППЯ на основі інтегрування СДР, методів обчислення ІКО на основі ПФ. БМО призначений для розв'язання задач ідентифікації параметрів моделей та синтезу оптимальних ІУС. Цей блок містить програми методів одновимірного пошуку, багатовимірної безумовної оптимізації, глобального пошуку, генетичних алгоритмів, методів мінімізації суми квадратів, умовної оптимізації, векторних методів оптимізації. БМО використовує функції БОКЯС.

Для взаємодії всіх елементів ІТ розроблений МСД. У цей модуль входять структура постійних параметрів задач і методів оптимізації, структура даних процесів оптимізації, структура функцій для задач

оптимізації та методи обробки цих структур. БПІ призначений для табличного та графічного виводу процесу розв'язання задач оптимізації ІУС.

На рис. 2 представлена функціональна модель процесу оптимізації. Така модель враховує складність розв'язання задач оптимізації управління СДС та завдяки використанню структур даних задач і процесу оптимізації та розділенню процесу оптимізації на початок і продовження дозволяє запам'ятовувати процес оптимізації з можливістю його продовження або подання результатів.

Блок моделей систем. БМС містить програми математичних моделей ДС для аналізу, ідентифікації та оптимізації. Нелінійні моделі ДС представлені СДР:

$$dX/d\tau = f(X, x, c, g), \quad X(\tau_0) = X_0, \quad (1)$$

де X – вектор відносних змінних стану ДС;
 τ – відносна змінна часу;
 f – векторна функція правих частин СДР;
 x – вектор змінних параметрів ДС;
 c – вектор постійних параметрів ДС;
 g – вектор зовнішніх дій;
 τ_0 – початкове значення відносною змінної часу;
 X_0 – вектор початкових умов.
 Підвищити швидкість розрахунків дозволяють лінійні моделі ДС:

$$dX/d\tau = A(x)X + B(x)g, \quad X(\tau_0) = X_0, \quad (2)$$

де $A(x)$ і $B(x)$ – матриці стану і входу, що залежать від вектора змінних параметрів ДС x .



Рис. 1. Структура інформаційної технології

Цій моделі відповідає ПФ:

$$W(x, s) = \beta(x, s)/\alpha(x, s), \quad (3)$$

де $\beta(x, s)$ і $\alpha(x, s)$ – многочлени змінної Лапласа s , коефіцієнти яких залежать від вектора змінних параметрів ДС x .

Розроблені математичні моделі для СДС та їх ІУС: ядерних реакторів ВВЕР-1000 різних серій; парогенератора ПГВ-1000; парових турбін К-1000-60/1500, К-1000-60/1500-2, К-220-4,4-3; реакторної установки; систем другого контуру енергоблоку АЕС; енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000; квадрокоптера; генераторів електричних імпульсів напруги та струму; фільтрів Баттерворта; інших ДС. Модулі для цих ДС включають файли з вихідними даними параметрів та обчисленням параметрів, програми з базами даних (БД) різних моделей, функції самих моделей та їх ІУС з різними регуляторами, програми дослідження процесів, ідентифікації та оптимізації параметрів, а також допоміжні програми.

Модуль методів інтегрування. ММІ містить програми для розв’язання лінійних та нелінійних СДР (1) і (2) різними методами інтегрування. В цей модуль для підвищення точності та надійності обчислень обрані матричні методи інтегрування – метод матричної експоненти, системні методи першого, другого та третього ступенів, а також однокрокові

методи Мерсона, Фельдберга та інші. Інтегрування лінійних СДР (2) виконується методом матричної експоненти та її інтегралу за допомогою підпрограми, де вхідними параметрами є матриці моделі лінійної СДР (2), кінець інтервалу інтегрування та число кроків інтегрування, а вихідними параметрами – масив моментів часу, масив значень перехідного процесу. Для інтегрування нелінійних СДР (1) використовуються системні методи першого, другого та третього ступенів, що реалізовані підпрограмами, в яких вхідними параметрами є векторна функція правих частин СДР (1), вектор стану, вектори змінних та постійних параметрів, вектор зовнішніх дій, кінець інтервалу інтегрування, кількість кроків інтегрування, а вихідними параметрами – масив моментів часу та масив значень перехідного процесу для усіх змінних стану у вигляді двовимірного масиву. Ці підпрограми використовують допоміжні підпрограми: підпрограму, що обчислює матрицю Якобі для векторної функції нелінійної СДР (1); підпрограму, що обчислює інтеграл матричної експоненти у вигляді матричного ряду з мінімізацією кількості обчислень без зменшення точності.

Блок обчислення критеріїв якості систем. У БОКЯС входять модулі для обчислення критеріїв стійкості ІУС, критеріїв ідентифікації, ППЯ і ІКО.

Модуль критеріїв стійкості ІУС призначений для аналізу стійкості лінійних систем з ПФ (3) та

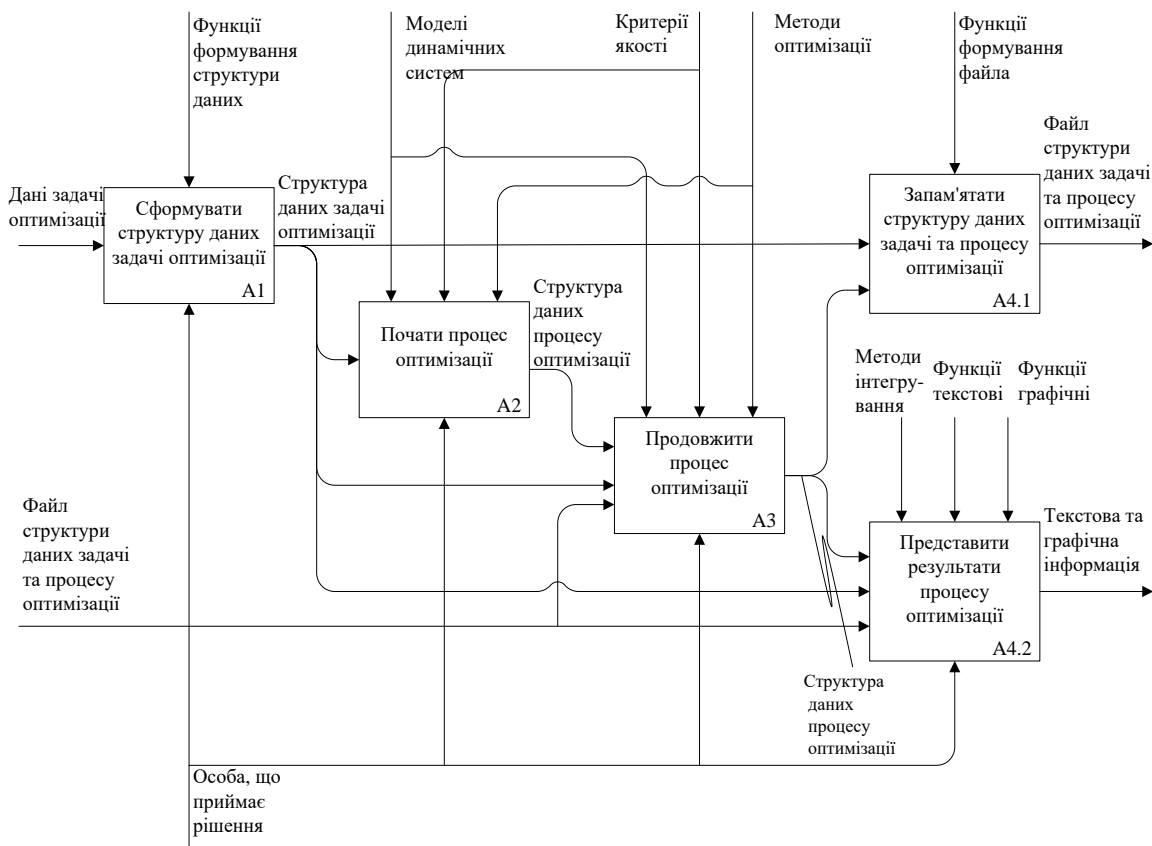


Рис. 2. Функціональна модель процесу оптимізації

обчислення критеріїв стійкості на основі характеристичного многочлена

$$\alpha(x, s) = \alpha_0(x)s^n + \alpha_1(x)s^{n-1} + \dots + \alpha_n(x). \quad (4)$$

У ньому реалізовані методи аналізу стійкості: обчислення ступеня стійкості, визначення ознаки стійкості многочлена (4) за ознакою стійкості Стодоли та критерію Рауса з обчисленням елементів першого стовпця таблиці Рауса $\rho_i(x)$, $i = \overline{1, n}$, визначення меж стійкості, обчислення векторної цільової функції (ВЦФ) стійкості $F_S(x)$ для послідовного виконання обмежень області стійкості, побудови графіків ступеня стійкості.

Модуль критеріїв ідентифікації ІУС призначений для обчислення критеріїв ідентифікації параметрів систем для мінімізації середньоквадратичного відхилення (СКВ) $S(x)$ теоретичних даних від експериментальних. У цьому модулі реалізовані методи розв'язання задач ідентифікації параметрів лінійних систем – функції ідентифікації параметрів ІУС, ВЦФ ідентифікації з СКВ $F_I(x)$ на основі $F_S(x)$.

Модуль ППЯ призначений для аналізу та обчислення ППЯ процесів ІУС: перерегулювання $\sigma(x)$, розмаху коливач $\zeta(x)$, загасання коливач $\lambda(x)$, часу регулювання $\tau_c(x)$ [7]. У цьому модулі реалізовані методи аналізу та розв'язання задач оптимізації параметрів ІУС за ППЯ:

$$\sigma(x) \leq \sigma_m, \zeta(x) \leq \zeta_m, \lambda(x) \leq \lambda_m, \min \tau_c(x), \quad (5)$$

де $\sigma_m, \zeta_m, \lambda_m$ – максимально допустимі значення показників якості.

Модуль ППЯ включає функції обчислення ППЯ ІУС, ВЦФ з ППЯ $F_C(x)$ на основі $F_S(x)$ для лінійних і нелінійних ІУС (1) і (2).

Модуль методів обчислення ІКО призначений для аналізу та обчислення покращених ІКО якості ІУС $I(x)$ [7]. У ньому реалізовані методи розв'язання задач оптимізації параметрів ІУС за покращеними ІКО – формування еталонної ІУС, функції обчислення ІКО ІУС, обчислення ВЦФ з ІКО $F_E(x)$.

Всі модулі БОКЯС включають БД задач, тестові моделі, сценарії тестування програм.

Блок методів оптимізації. БМО містить програми методів оптимізації: одновимірної пошуку, багатовимірної безумовної оптимізації, глобального пошуку, генетичних алгоритмів, мінімізації суми квадратів, умовної оптимізації, векторних методів оптимізації. Модуль методів одновимірної пошуку для розв'язання задачі $\min f(x)$, $x \in R$ включає програми методів та допоміжні програми. У цьому модулі реалізовані методи Свенна, поділу інтервалу навпіл, дихотомії, Фібоначчі, золотого перетину, адаптації кроку, бісекції, квадратичної інтерполяції з трьома та двома точками, січних, Ньютона, кубічної інтерполяції з чотирма та двома точками.

У модулі методів багатовимірної безумовної оптимізації для розв'язання задачі $\min f(x)$, $x \in R^p$ реалізовані методи покоординатного спуску, сполучених напрямків Пауелла, Бокса, симплексного

пошуку, Нелдера – Міда, Хука – Дживса, найшвидшого спуску, Флетчера – Рівса, Полака – Ріб'єра, Ньютона, Марквардта, Бройдена, Девідона – Флетчера – Пауелла, Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно. У відповідності з рис. 2 для цих підпрограм реалізовані функції ініціалізації та ітерації.

Модуль методів глобального пошуку мінімуму багатоекстремальних функцій включає методи Вейля, випадкового пошуку, сферичного випадкового пошуку, направляючих конусів, рою часток, бінарний та безперервний генетичні алгоритми.

Модуль мінімізації суми квадратів для розв'язання задачі $\min S(x)$, $x \in R^p$ реалізує методи Гаусса – Ньютона і Левенберга – Марквардта.

У модулі методів умовної оптимізації реалізовані методи бар'єрів, внутрішньої та зовнішньої точок, комбінованих штрафних функцій, ковзного допуску. Існує можливість задавати довільні методи одновимірної пошуку та багатовимірної безумовної оптимізації.

Векторні методи оптимізації використовують методи одновимірної пошуку та методи багатовимірної безумовної оптимізації для розв'язання задач умовної та багатокритеріальної оптимізації на основі класів векторних функцій – векторних ШФ і ВЦФ. Завдяки переважанню операцій всі підпрограми оптимізації працюють як з векторними функціями, так й із звичними скалярними цільовими функціями залежно від оголошення їх класу в підпрограмі задачі оптимізації.

Підпрограми всіх методів оптимізації містять необхідні математичні операції конкретного методу. Для загальних операцій створений модуль утиліт, який містить підпрограми обчислення значення цільової функції, обчислення функції в новій точці пошуку, перевірки критеріїв виходу, лічильника числа ітерацій, загальних операторів ітерації, кроку одновимірної пошуку, простого режиму з однією задачею і одним методом, пакетного режиму запуску задач і методів оптимізації, перемикання режимів роботи. Якщо установлена ознака для запам'ятовування процесу оптимізації, процес оптимізації запам'ятовується у зовнішньому файлі. Цей процес можна відобразити або продовжити (рис. 2). Перевірка критеріїв виходу виконується при кожному обчисленні цільової функції. Це дозволяє точніше обчислити характеристики ефективності методів оптимізації. Є можливість подавати як всі точки пошуку, так і тільки кращі точки.

У кожному модулі методів оптимізації є БД методів. Якщо метод оптимізації починає розв'язувати задачу оптимізації, то запускається функція початку методу, після якої виконується ітераційний цикл методу доти, поки не виконається умова завершення методу (рис. 2). Для тестування методів оптимізації створені модулі тестових функцій, які включають тестові функції, їх БД та сценарії тестування.

Загальні структури даних. Для зменшення кількості формальних параметрів підпрограм, підвищення надійності і спрощення узгодження роботи комплексу програм при його розвитку без зміни інтерфейсних частин підпрограм запропоновані глобальні структури

даних. Структура постійних параметрів містить у своїх полях постійні параметри задачі оптимізації, методу її розв'язання, таблиць і графіків відображення результатів. В багатьох підпрограмах ІТ широко використовуються функції зміни полів цієї структури та доступ до її опцій значень. Структура процесу оптимізації містить змінні дані про поточний стан процесу оптимізації та дозволяє спростити управління цим процесом. Ця структура створюється і розширюється підпрограмами відображення і збереження таблиць і графіків процесу оптимізації, попереднього виділення пам'яті під масиви для табличного і графічного подання процесу оптимізації. Структура функцій оптимізації містить типи функцій для розв'язання різних задач оптимізації та узгодження методів одновимірного пошуку, багатовимірної безумовної оптимізації й умовної оптимізації. Типи функцій цієї структури дозволяють використовувати різні методи оптимізації для розв'язання складних задач і уникати дублювання програмного коду.

Блок подання інформації розв'язання задач. У БП розв'язання задач реалізовані текстові та графічні можливості ІТ. У модулі табличного подання процесу оптимізації знаходяться функції формування і подання елементів таблиці: заголовку, значень критеріїв закінчення, кількості ітерацій та обчислення функції, значення функції та її аргументів, результатів оптимізації. Модуль графічного подання процесу оптимізації містить функції обчислення меж аргументів для побудови графіків, формування графічних масивів, подання графіків траєкторії оптимізаційного пошуку. Модуль подання перехідних процесів у ДС містить функції обчислення перехідних процесів у лінійних і нелінійних системах.

Висновки. Запропонована загальна структура і функціональна модель інформаційної технології оптимізації складних динамічних систем, яка включає моделювання динамічних систем у вигляді систем диференціальних рівнянь та передавальних функцій, інтегрування систем диференціальних рівнянь, обчислення критеріїв якості систем, методи для розв'язання різних задач оптимізації, наочне представлення інформації щодо розв'язків задач оптимізації динамічних систем. Представлені блоки й модулі інформаційної технології: блок моделей систем, модуль методів інтегрування, блок обчислення критеріїв якості систем, блок методів оптимізації, модуль загальних структур даних та блок подання інформації.

Список літератури

1. Бастриков М. В., Пономарев О. П. *Информационные технологии управления*. Москва: ЭКСМО, 2002. 391 с.
2. Павлов А. А., Теленик С. Ф. *Информационные технологии и алгоритмизация в управлении*. Киев: Техника, 2002. 344 с.
3. Ершова Н. М. *Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: монография*. Днепропетровск: ПРАСА, 2016. 272 с.
4. Ястребенекский М. А., Васильченко В. Н., Виноградов С. В. *Безопасность атомных станций: информационные и управляющие системы* / ред. М. А. Ястребенекского. – Київ: Техніка, 2004. 472 с.

5. Афанасьева О. В., Голик Е. С., Первухин Д. А. *Теория и практика моделирования сложных систем: Учебное пособие*. Санкт-Петербург: СЗТУ, 2005. 132 с.
6. Чернорутский И. Г. *Методы оптимизации в теории управления: Учебное пособие*. Санкт-Петербург: Питер, 2004. 256 с.
7. Бесекерский В. А., Попов Е. П. *Теория систем автоматического управления*. Санкт-Петербург: Профессия, 2004. 752 с.
8. Измаилов А. Ф., Солодов М. В. *Численные методы оптимизации: Учебное пособие*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 304 с.
9. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, Shetty C. M. *Nonlinear programming theory and algorithms; third edition* Hoboken, New Jersey: Wiley, 2006. 853 p.
10. Северин В. П., Никулина Е. Н. *Методы одномерного поиска: лабораторный практикум по курсу «Методы оптимизации»*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. 124 с.
11. Никулина Е. Н., Северин В. П., Лукинова Д. А. Математические модели для исследования переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2018. Вып. 1(77). С. 18-23.
12. Северин В. П., Никулина Е. Н., Лютенко Д. А. Многокритериальный синтез систем управления энергоблока АЭС с использованием лаборатории методов оптимизации OPTLAB. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 15(1124). С. 106-111.

References (transliterated)

1. Bastrikov M. V., Ponomarev O. P. *Informatsionnye tehnologii upravleniya* [Information technologies control]. Moscow, EKSMO Publ., 2002. 391 p.
2. Pavlov A. A., Telenik S. F. *Informatsionnye tehnologii i algoritimizatsiya v upravlenii* [Information technologies and algorithms in control]. Kiev, Tekhnika Publ., 2002. 344 p.
3. Ershova N. M. *Sovremennyye metody teorii proektirovaniya i upravleniya slozhnyimi dinamicheskimi sistemami: monografiya* [Modern methods of the theory of design and control of complex dynamic systems: monograph]. Dnepropetrovsk, PRASA Publ., 2016. 272 p.
4. Yastrebenetskiy M. A., Vasil'chenko V. N., Vinogradov S. V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy: informatsionnye i upravlyayushchie sistemy* [Nuclear power plant safety: information and control Systems]. Kiev, Tekhnika Publ., 2004. 472 p.
5. Afanas'eva O. V., Golik E. S., Pervukhin D. A. *Teoriya i praktika modelirovaniya slozhnykh sistem: uchebnoye posobiye* [Theory and practice of modeling complex systems: Textbook]. St. Petersburg. SZTU Publ., 2005. 132 p.
6. Chernorutskiy I. G. *Metody optimizatsii v teorii upravleniya: uchebnoye posobiye* [Optimization methods in control theory: Textbook] St. Petersburg. Piter Publ., 2004. 256 p.
7. Besekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg. Professiya Publ., 2004. 752 p.
8. Izmailov A. F., Solodov M. V. *Chislennyye metody optimizatsii: uchebnoye posobiye* [Numerical optimization techniques: Textbook]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 304 p.
9. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, Shetty C. M. *Nonlinear programming theory and algorithms; third edition* Hoboken, New Jersey: Wiley, 2006. 853 p.
10. Severin V. P., Nikulina E. N. *Metody odnomernogo poiska: laboratornyy praktikum po kursu «Metody optimizatsii»* [One-dimensional search methods: laboratory practice on the course "Optimization Methods"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2013. 124 p.
11. Nikulina E. N., Severin V. P., Lukinova D. A. Matematicheskie modeli dlya issledovaniya perekhodnykh rezhimov yadernogo reaktora VVER-1000 serii V-320 [Mathematical models for investigation of transient regimes of VVER-1000 nuclear reactor of V-320 series]. *Ядерная та радіаційна безпека* [Nuclear and radiation safety]. 2018, no. 1(77), pp. 18-23.
12. Severin V. P., Nikulina E. N., Lukinova D. A. Mnogokriterial'nyy sintez sistem upravleniya ehnergobloka AES s bspol'zovaniem laboratorii metodov optimizatsii [Multicriteria synthesis of NPP power unit control systems using the OPTLAB optimization methods laboratory]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat.*

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна (Нікуліна Елена Николаевна, Nikulina Olena Mykolaivna) – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

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

Коцюба Ніна Вікторівна (Коцюба Нина Викторовна, Kotsiuba Nina Viktorivna) – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

Нікуліна Елена Николаевна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерий Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Коцюба Нина Викторовна (Коцюба Нина Викторовна, Kotsiuba Nina Viktorivna) – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

Nikulina Olena Mykolaivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Severyn Valerii Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Kotsiuba Nina Viktorivna – Assistant of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

UDC 004.93

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.12

K. S. KHABARLAK, L. S. KORIASHKINA

MOBILE ACCESS CONTROL SYSTEM BASED ON RFID TAGS AND FACIAL INFORMATION

RFID tags see a widespread use in modern security systems, including home intercoms, access control cards, contactless credit cards, biometric passports. Here we focus on a single application, namely access control systems. Currently they have either high cost or low security guarantees. Hence, the developments focusing on improving access control security while lowering the cost is a rapidly developing field. The purpose of this work is to create an alternative access control scheme, where card scanners are replaced with passive RFID tags, and all of the communication is done via user's smartphone Wi-Fi. Based on the analysis of existing approaches to the development of access control systems, it was concluded that use of mobile systems is the most promising due to their expandability and presence of a large number of sensors, such as NFC, camera etc. In the proposed model RFID tags are mounted near a turnstile or a smart door. Tag reading and programming is done via NFC chip directly on an Android or iOS mobile device, which allows for a significant price cut for such a system implementation. A detailed description of a tag writing procedure with the data required to perform it is provided. To enhance security, together with smartphone-based authorization we require the user to provide his photograph while entering a secure gate. The photograph is then displayed on a monitoring dashboard side-by-side with his registration picture, so that the two can then be matched

© К. С. Хабарлак, Л. С. Коряшкіна, 2020

against each other. The developed client-server application offers administrative system used to configure gate access policies and monitor entrances with filters by access time, user and gate. Besides that, we propose a mobile application that allows gate registration and serves as a door unlock key. The access control model that we suggest reduces installation costs required, as it is fully wireless and uses cheap autonomous RFID-tags as its main component. We expect the presented application to be easy in adaptation to customer needs and to existing security systems.

Keywords: access control system, RFID tags, NFC, mobile access control, security, person identification.

К. С. ХАБАРЛАК, Л. С. КОРЯШКИНА

МОБИЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RFID МІТОК ТА ІНФОРМАЦІЇ ПРО ОБЛИЧЧЯ

У сучасних системах безпеки RFID-мітки використовуються всюди – у домофонах, пластикових картках систем контролю доступу, безконтактних кредитних картках, біометричних паспортах. У даній роботі ми сфокусуємо увагу на одному застосуванні – системах контролю доступу. Оскільки існуючі комерційні реалізації таких систем характеризуються або ж високою вартістю, або низьким рівнем безпеки, актуальним напрямком наукових досліджень в області комп'ютерних інформаційних технологій є розробки, що сприяють удосконаленню систем безпеки при одночасному їх здешевленні. Метою даної роботи є створення альтернативної схеми системи контролю доступу, у якій замість сканерів використовуються RFID-мітки, а для комунікації через Wi-Fi – тільки мобільний пристрій відвідувача. На основі результатів аналізу існуючих підходів до розробки систем контролю доступу та їх реалізацій, було зроблено висновок про те, що найбільш перспективним є використання мобільних систем в силу їх розширюваності та наявності великої кількості сенсорів – NFC, камера та ін. У запропонованій моделі системи контролю доступу RFID-мітки встановлюються стаціонарно біля турнікету або розумної двері. Програмування та читання міток відбувається чипом NFC мобільного пристрою на платформі Android або iOS, що дозволяє значно зменшити вартість впровадження такої системи. В роботі детально описано процедуру запису міток, а також використовувани при цьому дані. Разом із авторизацією за смартфоном, для забезпечення додаткової безпеки, фотографія користувача, зроблена при вході на фронтальну камеру мобільного пристрою, відображається на панелі моніторингу поряд із його фотографією під час реєстрації для порівняння. Розроблений клієнт-серверний додаток включає не тільки адміністративну систему для налаштування політик доступу до об'єктів та моніторингу із фільтрами за часом доступу, користувачу та двері із міткою, але й мобільний додаток, що дозволяє реєструвати об'єкти та є перепусткою для відкриття дверей. Запропонована модель мобільної системи контролю доступу дозволяє зменшити загальну ціну встановлення такої системи, оскільки вона є бездротовою та використовує недорогі автономні RFID-мітки. Крім того, архітектура розробленого програмного продукту забезпечує легку адаптацію до потреб підприємства або існуючих систем контролю доступу.

Ключові слова: система контролю доступу, RFID-мітки, NFC, мобільний контроль доступу, безпека, ідентифікація особи.

К. С. ХАБАРЛАК, Л. С. КОРЯШКИНА

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСТУПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RFID МЕТОК И ИНФОРМАЦИИ О ЛИЦЕ

В современных системах безопасности RFID-метки используются повсеместно – домофоны, пластиковые карты систем контроля доступа, бесконтактные кредитные карты, биометрические паспорта. В данной работе мы сфокусируем внимание на одном применении – системах контроля доступа. Поскольку существующие коммерческие реализации таких систем характеризуются либо высокой стоимостью, либо низким уровнем безопасности, актуальным и активно развивающимся направлением научных исследований в области компьютерных информационных технологий являются разработки, способствующие усовершенствованию систем безопасности при одновременном их удешевлении. Целью данной работы является создание альтернативной схемы системы контроля доступа, в которой вместо сканеров используются RFID-метки, а для коммуникации через Wi-Fi – только мобильный телефон посетителя. На основе результатов анализа существующих подходов к разработке систем контроля доступа и их реализаций, был сделан вывод о том, что наиболее перспективным является использование мобильных систем в силу их расширяемости и наличия большого количества сенсоров – NFC, камера и др. В предложенной модели системы контроля доступа RFID-метки устанавливаются стационарно возле турникета или умной двери. Программирование и чтение меток производится чипом NFC мобильного устройства на платформе Android или iOS, что позволяет значительно уменьшить стоимость внедрения такой системы. В работе подробно описана процедура записи меток, а также используемые при этом данные. Вместе с авторизацией по смартфону, для обеспечения дополнительной безопасности, фотография пользователя, сделанная при входе на фронтальную камеру мобильного устройства, отображается на панели мониторинга рядом с его фотографией при регистрации для ее идентификации. Разработанное клиент-серверное приложение включает не только административную систему для настроек политик доступа к объектам и мониторинга с фильтрами по времени доступа, пользователю и двери с меткой; но и мобильное приложение, позволяющее регистрировать объекты и являющееся пропуском для открытия дверей. Предложенная модель мобильной системы контроля доступа позволяет уменьшить общую цену установки такой системы, так как является беспроводной и использует недорогие автономные RFID-метки. Кроме того, архитектура разработанного программного продукта обеспечивает легкую его адаптацию к потребностям предприятия или существующим системам контроля доступа.

Ключевые слова: система контроля доступа, RFID-метки, NFC, мобильный контроль доступа, безопасность, идентификация личности.

Introduction. Many of the modern enterprises use turnstiles or smart doors with access card scanners, where predominantly RFID cards are used. To provide extra security guarantees schools and universities also employ such systems as being cheap and easy to use. In the same time, they have a serious drawback, namely the card can be easily lost, which means an intruder can access the enterprise unnoticed, that in turn may cause critical consequences such as an accident, sensitive information loss etc. Installing video surveillance cameras may be a partial solution, which allows to detect such an access in a retrospect. However, storing video surveillance during a long timeframe may take a lot of disk space. The most efficient yet expensive approach to solving the problem is an installation of expensive biometric systems recognizing

face or fingerprint (the latter can be recognized via the terminal or directly on a special access control card).

Using smartphone's NFC chip for secure authentication sees an ever-increasing interest. In this paper, we describe a novel access control scheme, which doesn't use card scanner and offers higher security guarantees when entering a gateway without needing video surveillance cameras.

Review of existing approaches. To begin with, let us describe existing commercial systems, which control the access by means of a personal identifier. Company [1] proposes systems based on using plastic cards or fingerprint. Manufacturer [2] features a more advanced set of products including virtual mobile cards (NFC-based), bank credit card authentication or biometric systems

(fingerprint or facial recognition). A comprehensive list of currently available commercial products is presented in [3]. These can be categorized in 1) products supporting only classical plastic card id; 2) products that additionally include support for NFC or Bluetooth Low Energy (if NFC is not available); 3) biometric systems. Unique identifier in NFC compatible systems (point 2 above) is granted either via a global server for all clients (in this case a regular fee is taken) or for free based on a unique id of a smartphone (IMEI) or a SIM-card (IMSI). Identifier can be blocked if requested. Wherein, there may arise at least two cases of unauthorized access to the enterprise, that are impossible to track down: 1) after having lost the mobile device and before locking its id; 2) in case of intentional transfer of a smartphone to third parties. That is to say that such systems are quite vulnerable on its own.

Let us also highlight some of the more advanced systems. In [4] authors note a growing interest in access cards having an extra level of security. Multi technology cards offering embedded fingerprint scanner together with a standard passive RFID tag are said to be an interesting and promising advancement in the field. To supply the scanner, these cards also have an ultra slim battery. Surely, this comes with a higher price.

Next let's consider research of promising combined systems. Patent [5] contains a description of a biometric system, in which RFID tag holders are also verified via a standalone facial recognition system. This allows to solve additional problems of access control systems like 1) buddy badging, when one person logs two badges, while only one actually enters the gate; 2) tailgating, when several people enter while using the same badge. Let any access violation occur, the door will be locked and a special lighting stack will alert the guards to intrude. A similar system with a different alerting method is proposed by [6] for access control in university hostels.

To sum it all up, all of the abovementioned systems have either almost no defense against card transfer (classical or NFC-based systems) or have a high price (biometric systems including fingerprint and facial recognition, as well as combined systems).

Mobile access control system model. Here we propose to turn the classical access control scheme “upside-down”. Firstly, instead of a RFID card scanner, which has to be connected to a computer or can be embedded into a smart door, we propose using passive RFID tags similar to those found in today’s plastic cards. They can store enough data for our system and are much cheaper. Secondly, instead of plastic cards we suggest employing user’s smartphone. By holding the device near a passive tag, the application we have developed, will be automatically started. All information about gate location to which the tag is attached will also be automatically scanned. Also, to avoid the need of a standalone video surveillance camera installation, we require the user to take a photograph on his frontal camera. After that, information from the tag as well as user’s data, including user id, location and photograph, is sent to the server via a corporate Wi-Fi network. Figure 1 has a comparison of typical access control system (fig. 1, a) and the one we propose (fig. 1, b). As can be seen from the picture, the proposed system doesn’t need camera or RFID scanner installation, furthermore no wiring is required as all of the communication is done using smartphone’s Wi-Fi connection.

Adding tags to the system. As is known, RFID (Radio Frequency Identification) tag is a device that can store a small amount of data, usually below 888 bytes (while there exist modifications with higher memory capacity, they are rare). The tags are classified into active, which contain an embedded energy source (battery). Their advantage is in high acting distance (up to 100m). And passive – this is the type of tag used in intercoms, biometric passports, contactless credit cards and classical access control systems. Such tags are cheaper than active, but can work only on a short distance ranging from several centimeters to meters depending on a standard and working frequency. Because in passive tags the microchip has no built-in power source, an electromagnetic coil is installed instead. A device for reading and programming the tag (including a smartphone) creates an electromagnetic field inducing a current in the tag by the Faraday’s law [6].

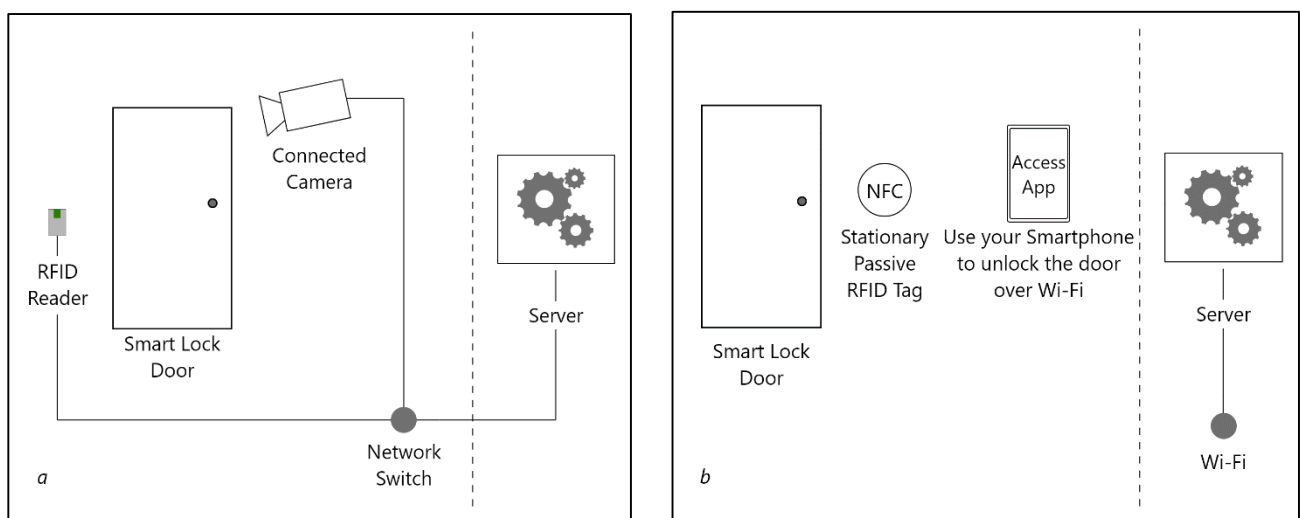


Fig. 1. a – typical access control system; b – our system

Smartphones contain a so-called NFC chip (Near Field Communication) to read and program RFID tags. It should be noted, that not all of existing tags on the market are compatible with NFC. Three main tag types, supporting NFC include: MIFARE Classic®, MIFARE Ultralight® and NTAG®. The latter two have the best support among mobile devices [7], and NTAG has the largest capacity. Thus, in our product we support two its main modifications: NTAG213 (144 bytes) and NTAG216 (888 bytes) [8]. Besides the described writable memory, the tag also contains serial number, an option to enable write password protection and an irreversible switch to read-only mode.

In our system tag programming is supposed to happen on a device of an enterprise security administrator with a use of a special account. The first step is to fill data about the gate to which the tag is going to be attached. The data includes unique object name and its location. In response to tag registration request, server generates a unique unsigned integer id for the gate, which together with server identifier is written on the tag. In order to avoid data rewrite by third party applications or intentional data corruption, tag programming is protected via tag programming password (as we have described earlier, this capability is built into the chosen RFID tag standards). The password is global for the given organization and is automatically sent from the server. Given the described information, the administrator should bring the device to the tag at a distance of 1–3 cm for the programming to take place. If the tag is already password protected, then the operator should enter old password and take the device to the tag again. Then the administrator needs to setup user access policies for the registered tag in a special server-side administrative application (which we will describe in the next section).

The data written to the tag is stored in a special binary format called NDEF (NFC Data Exchange Format), that is implemented on Android via a special NdefMessage message type, containing a set of data records, called NdefRecord [9]. In our system we write:

1) global unique server identifier (server GUID), which we use to verify that the user registered in one organization will not try to get access to another one. It should be noted that a distinctive feature of GUID generation is its high randomness, meaning that its collisions are nearly impossible [10];

2) unsigned integer, representing gate id inside the organization;

3) a special Android Application Record (AAR) [9] used to launch the application instantly, when the device is held near the tag. The only requirement here is that the device should be unlocked. It is of no importance if any application is already running (either our or third party);

4) a similar record for iOS devices, containing the so-called Universal Link.

Having calculated each field's size (table 1), it can be noted, that each one of the considered RFID tag standards has enough memory for the developed system.

It is noteworthy that Apple iOS smartphones did not contain NFC chip for a long time [7], and even after its appearance NFC use was limited to Apple Pay functionality only. Currently, NFC development APIs are being rapidly added to the iOS operating system. Since iOS 11.0 it is possible to read RFID tags, and iOS 13.0 has introduced a

tag write capability [11]. New devices also feature support for background tag reading [12]. That is a feature mostly analogous to the AAR, with a difference in that the application is not launched automatically, but a notification is presented to the user, inviting him to launch it. As we have already mentioned, the iOS launch record is written in Universal Link format [13]. Thereby, while we have developed the mobile application for Android devices only (at least for now), all of the functionality is available on both mobile platforms.

Table 1 – Data written on the RFID tag

Content	Size (bytes)	Description
Server ID	16	GUID
Secure gate ID	4	Unsigned integer
Android Application Record	42	Depends on application name length
iOS Universal Link	58	Depends on application name length
Overall	120	

Server-side control system. The main instrument for administrator is a server-side control panel, implemented in a form of a web-site. Administrative account is needed to access the panel. In there the administrator can register a new smartphone user. Entering first and last name, as well as person's photograph is sufficient to complete the process. It should be noted that it is the administrator's responsibility to guarantee the correctness of the entered data. Here the configuration of gate access policies is also available. In a separate monitoring tab of the control panel latest accesses can be viewed.

To setup gate access policies, the tags needed must have already been registered via the mobile application as it was previously described. Then the administrator can select the tag to configure from the drop-down list (fig. 2) to add, view or edit existing accesses. To enhance the security each access record should have an expiration date set, after which the access will automatically be disabled (if access is not extended by the administrator). Based on the expiration date a corresponding status (active or expired) is shown.

After the initial setup, the main panel that we expect to be used is the monitoring panel, where we propose a number of features (fig. 3): 1) an ability to view access records in real time or by time filter (for example, during or outside the working hours); 2) filter by the tag to which an access attempt has been made; 3) filter by user; 4) also, an option to display denied accesses only can be selected. Each of the filters can be left empty if need. It should be noted, that while currently we use face information only to be able to track the actual person that tried to pass the gate manually (by a human being), in future we suggest extending such a system via mobile face recognition as described in [14].

Backend and third-party services integration.

Along with the above described user-facing parts, we also have a server backend used to communicate with a mobile application via REST API. Also, we have implemented a SignalR [15] endpoint for third-party services integration. In our system we do not propose turnstile or smart door

systems, so we expect the end-users to be able to quickly adapt their existing door or turnstile systems via the provided API. The SignalR itself is a set of libraries for server-side as well as mobile and web integrations, which as we hope, will allow for a seamless implementation of our system into existing infrastructure.

Conclusions. Client-server application has been presented in the paper, which includes: 1) administrative

system to configure gate access policies and monitoring with filters by access time, user and RFID-tagged gate; 2) mobile application made to register gates and being a key to unlock the doors. The implementation of the developed system will allow to lower the cost of access control systems in schools, universities and enterprises by not only replacing stationary RFID scanner by a cheap tag, but also by not requiring video surveillance camera installation. The latter is not needed as it's enough for the

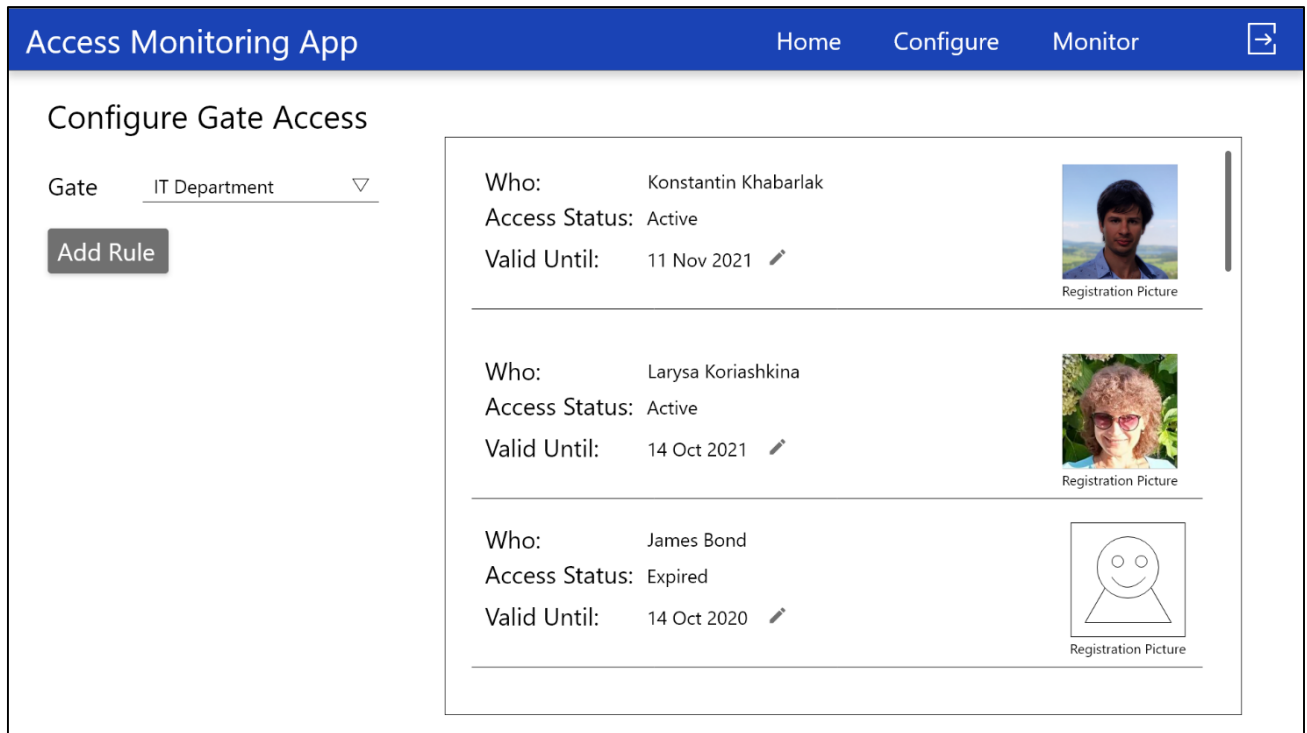


Fig. 2. Configuration tab of the proposed access control system

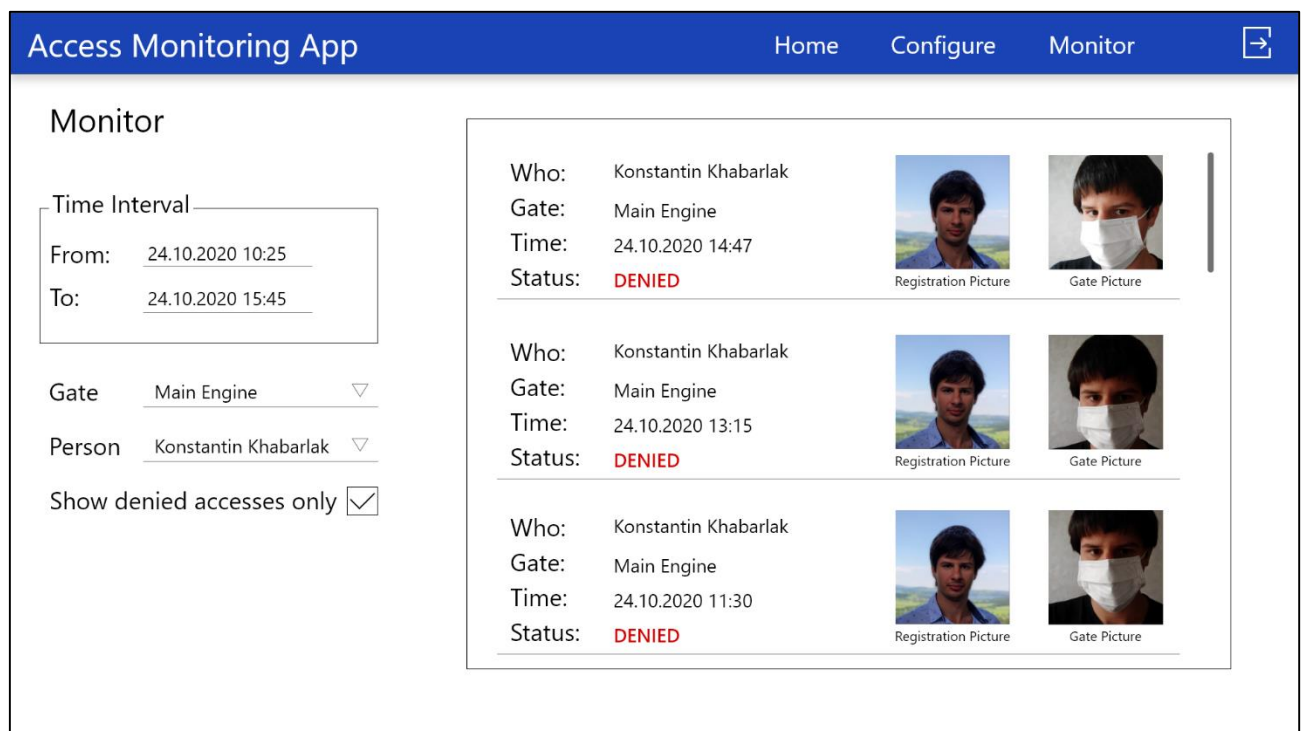


Fig. 3. Monitoring tab of the proposed access control system

user to take a photograph on his mobile phone when unlocking the door. We hope, that the proposed application will make a contribution to the development of more secure and less expensive access control systems.

We see an implementation of a mobile face recognition system as one of the next steps to enhance the proposed application.

References

1. *Защита информации. Контроль доступа. Учёт рабочего времени.* URL: <http://www.ualock.kiev.ua/index.htm> (accessed: 23.10.20).
2. *Системы безопасности PERCo.* URL: <https://www.perco.ru/> (accessed: 23.10.20).
3. *Мобильный доступ — использование смартфона в системах контроля доступа.* URL: <https://habr.com/ru/company/intems/blog/433872/> (accessed: 12.10.20).
4. *Карты контроля доступа.* URL: <http://www.techportal.ru/glossary/karti-kontrolya-dostupa.html> (accessed: 12.10.20).
5. Kail K., Williams C., Kail R. *Access control system with RFID and biometric facial recognition.* U.S. Patent No. 11/790,385. 2007.
6. Farooq U. et al. *RFID based security and access control system //International Journal of Engineering and Technology.* – 2014. – Т. 6. – №. 4. – С. 309. doi: 10.7763/IJET.2014.V6.718
7. *NFC Compatibility.* URL: <https://www.shopnfc.com/en/content/7-nfc-compatibility> (accessed: 12.10.20).
8. *NFC Tag Specs – Tag NFC.* URL: <https://www.tagnfc.com/en/info/11-nfc-tags-specs> (accessed: 12.10.20).
9. *NFC basics.* URL: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/nfc/nfc> (accessed: 13.10.20).
10. *What is GUID?* URL: <http://guid.one/guid> (accessed: 24.11.20).
11. *Core NFC | Apple Developer Documentation.* URL: <https://developer.apple.com/documentation/corenfc> (accessed: 23.10.20).
12. *Adding Support for Background Tag Reading | Apple Developer Documentation.* URL: https://developer.apple.com/documentation/corenfc/adding_support_for_background_tag_reading (accessed: 23.10.20).
13. *Allowing Apps and Websites to Link to Your Content | Apple Developer Documentation.* URL: https://developer.apple.com/documentation/xcode/allowing_apps_and_websites_to_link_to_your_content (accessed 23.10.20).
14. Khabarлак K., Koriashkina L. *Fast Facial Landmark Detection and Applications: A Survey //ResearchGate preprint.* – 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.32735.07847

15. *Real-time ASP.NET with SignalR | .NET.* URL: <https://dotnet.microsoft.com/apps/aspnet/signalr> (accessed: 23.10.20).

References (transliterated)

1. *Zashchita informatsii. Kontrol' dostupa. Uchot rabochego vremeni [Information Protection. Access Control. Time Tracking].* Available at: <http://www.ualock.kiev.ua/index.htm> (accessed 23.10.20).
2. *Sistemy bezopasnosti PERCo [PERCo Security Systems].* Available at: <https://www.perco.ru/> (accessed 23.10.20).
3. *Mobil'nyy dostup — ispol'zovaniye smartfona v sistemakh kontrolya dostupa [Mobile access - using a smartphone in access control systems].* Available at: <https://habr.com/ru/company/intems/blog/433872/> (accessed 12.10.20).
4. *Karty kontrolya dostupa [Access Control Cards].* Available at: <http://www.techportal.ru/glossary/karti-kontrolya-dostupa.html> (accessed 12.10.20).
5. Kail K., Williams C., Kail R. *Access control system with RFID and biometric facial recognition.* U.S. Patent No. 11/790,385. 2007.
6. Farooq, Umar, et al. *RFID based security and access control system.* International Journal of Engineering and Technology 6.4 (2014): 309. doi: 10.7763/IJET.2014.V6.718
7. *NFC Compatibility.* Available at: <https://www.shopnfc.com/en/content/7-nfc-compatibility> (accessed 12.10.20).
8. *NFC Tag Specs – Tag NFC.* Available at: <https://www.tagnfc.com/en/info/11-nfc-tags-specs> (accessed 12.10.20).
9. *NFC basics.* Available at: <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/nfc/nfc> (accessed 13.10.20).
10. *What is GUID?* Available at: <http://guid.one/guid> (accessed 24.11.20).
11. *Core NFC | Apple Developer Documentation.* Available at: <https://developer.apple.com/documentation/corenfc> (accessed 23.10.20).
12. *Adding Support for Background Tag Reading | Apple Developer Documentation.* Available at: https://developer.apple.com/documentation/corenfc/adding_support_for_background_tag_reading (accessed 23.10.20).
13. *Allowing Apps and Websites to Link to Your Content | Apple Developer Documentation.* Available at: https://developer.apple.com/documentation/xcode/allowing_apps_and_websites_to_link_to_your_content (accessed 23.10.20).
14. Khabarлак K., Koriashkina L. *Fast Facial Landmark Detection and Applications: A Survey //ResearchGate preprint.* – 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.32735.07847
15. *Real-time ASP.NET with SignalR | .NET.* Available at: <https://dotnet.microsoft.com/apps/aspnet/signalr> (accessed 23.10.20).

Received 30.11.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хабарлак Костянтин Сергійович – аспірант кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Senior Backend Developer в ІТ-компанії SOLVVE; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4263-0871>; e-mail: Khabarлак.K.S@nmu.one

Коріяшкіна Лариса Сергіївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6423-092X>; e-mail: Koriashkina.L.S@nmu.one

Хабарлак Константин Сергеевич – аспірант кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровская политехника», Senior Backend Developer в ІТ-компанії SOLVVE; г. Днепр, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4263-0871>; e-mail: Khabarлак.K.S@nmu.one

Коріяшкіна Лариса Сергеевна – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровская политехника»; г. Днепр, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6423-092X>; e-mail: Koriashkina.L.S@nmu.one

Khabarлак Kostiantyn Serhiyovych – PhD student at the department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology; Senior Backend Developer at SOLVVE IT-Company; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4263-0871>; e-mail: Khabarлак.K.S@nmu.one

Koriashkina Larisa Sergiyivna – PhD, Associate Professor at the department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6423-092X>; e-mail: Koriashkina.L.S@nmu.one

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	3
<i>Lysytskyi V. L., Boiko M. O.</i> Identification of problem situations in functional diagnostics of intelligent business systems	3
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	10
<i>Godlevskiy M. D., Goloskokova A. O., Burlakov G. O.</i> Динамічна модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE	10
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	17
<i>Gamayun I. P., Yershova S. I.</i> Методи компромісного вибору інтервалу змін модельного часу в імітаційних моделях.....	17
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L.</i> Capturing software requirements for business process model analysis and improvement ..	23
<i>Lisitsky V. L., Semenchenko A. I.</i> Assessment of the strategic potential of an intellectual business system operating in a dynamic external environment	28
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	33
<i>Sokol V. Y., Sapronov P. Y., Bilova M. O.</i> Using cloud platforms to build distributed learning management systems.....	33
<i>Tovstokorenko O. Yu., Gamzayev P. O., Tkachuk M. V.</i> Експериментальне дослідження ефективності застосування варіабельних проектних рішень на етапі супроводу програмного забезпечення систем «Розумний будинок»	39
<i>Selivorstova Y. R., Liutenko I. V.</i> Frameworks analysis and evaluation used in the web-application development	44
<i>Chalyi S. F., Leshchynskiy V. O., Leshchynska I. O.</i> Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах	51
<i>Chalyi S. F., Bogatov E. O.</i> Технологія автоматизованої побудови моделі прототипу бізнес-процесу на основі попередньої обробки журналу подій	57
<i>Nikulina O. M., Severyn V. P., Kotsuba N. V.</i> Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами	63
<i>Khabarлак K. S., Koriashkina L. S.</i> Mobile access control system based on RFID tags and facial information	69

CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY.....	3
<i>Lysytskyi V. L., Boiko M. O.</i> Identification of problem situations in functional diagnostics of intelligent business systems	3
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....	10
<i>Godlevskiy M. D., Goloskokova A. A., Burlakov G. A.</i> A dynamic model for development planning of process subsets for the SPICE reference maturity model	10
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING	17
<i>Gamayun I. P., Yershova S. I.</i> Method of compromise choice of interval of model time change in imitation model	17
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L.</i> Capturing software requirements for business process model analysis and improvement ..	23
<i>Lisitsky V. L., Semenchenko A. I.</i> Assessment of the strategic potential of an intellectual business system operating in a dynamic external environment	28
INFORMATION TECHNOLOGY	33
<i>Sokol V. Y., Sapronov P. Y., Bilova M. O.</i> Using cloud platforms to build distributed learning management systems.....	33
<i>Tovstokorenko O. Y., Gamzayev R. O., Tkachuk M. V.</i> An experimental study on effectiveness usage of variable design solutions by maintenance stage of software for "Smart-Home" systems.....	39
<i>Selivorstova Y. R., Liutenko I. V.</i> Frameworks analysis and evaluation used in the web-application development	44
<i>Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I.</i> Declarative-temporal approach to the construction of explanations in intelligent information systems	51
<i>Chalyi S., Bogatov I.</i> Technology of automated construction of a business process prototype model based on pre-processing of event logs	57
<i>Nikulina O. M., Severyn V. P., Kotsuba N. V.</i> Development of information technology for optimizing the control of complex dynamic systems	64
<i>Khabarлак K. S., Koriashkina L. S.</i> Mobile access control system based on RFID tags and facial information	69

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 2 (4) 2020

Наукові редактори: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
О. С. Куценко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій.
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: Mykola.Bezmenov@khi.edu.ua

Підп. до друку 29.12.2020 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,84.
Тираж 100 пр. Зам. № 102. Ціна договірна.

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