

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

№ 2 (10) 2023

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 2 (10) 2023

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2023

Kharkiv
NTU "KhPI", 2023

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2023. — № 2 (10) 2023. — 108 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.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів та спеціалістів у галузі системного аналізу, управління та комп'ютерних технологій.

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.

Ідентифікатор медіа R30-01544, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.2023 № 1075.

Мова статей – українська, 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 наукометричну базу даних 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).

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

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

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

Члени редколегії

Ахієзер О. Б., 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

Галуза О. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

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

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

Москаленко В. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Павлов О. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

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

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

Чередніченко О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

Відповідальний секретар

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

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

Akhiiezer O. B., 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

Galuzha O. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

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

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

Moskalenko V. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

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

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

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

Cherednichenko O. O., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

Executive secretary

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 11 від 26 грудня 2023 р.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.01

УДК 519.24

О. А. ПАВЛОВ, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, професор кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

М. Є. КИСЕЛЬОВ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, бакалавр кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: zeusmobilenick@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3686-3419>

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ УЗГОДЖЕНОГО ПЛАНУВАННЯ

Сучасні процеси глобалізації, економічної конкуренції потребують суттєвого підвищення вимог до професійного рівня менеджерів вищої ланки, що керують діяльністю міжнародних корпорацій, регіональних економік, галузевих міністерств тощо. Їх ефективна діяльність неможлива без використання основних наукових доробок та відповідного програмного забезпечення, що реалізують основний якісний закон управління складними організаційно-виробничими системами – закон узгодженого управління (планування), коли управлінські рішення на верхньому рівні враховують інтереси, що можуть не збігатися, або бути навіть антагоністичними у організаційно-виробничих підсистемах, зв'язаних певною структурою взаємних відносин в межах єдиної організаційно-виробничої складної системи. В даній роботі розглядається дворівнева організаційно-виробнича система, яка в термінах загальної відомої теорії активних систем задається як «центр прийняття рішень → елементи (організаційно-виробничої підсистеми)». Формальні моделі елементів розглядаються двох класів – лінійні неперервні та дискретні – агреговані моделі виробництва, що належать до одного класу NP-складних одноетапних задач календарного планування. Для обох типів моделей елементів приводяться компромісні критерії і відповідні їм методи побудови компромісних рішень, що ґрунтуються на результатах проф. Павлова О. А. для багатозалежного лінійного програмування, як наслідок його теоретичних досліджень для задач дискретної оптимізації в умовах невизначеності, та створеної їм та його учнями теорії ПДС-алгоритмів, тобто алгоритмів, що містять поліноміальні підалгоритми побудови допустимих розв'язків, що задовольняють теоретично обґрунтованим достатнім ознакам оптимальності. В цій роботі використовується ПДС-алгоритм для NP-складної задачі теорії розкладів – «Мінімізація зваженого сумарного моменту завершення виконання робіт на одному пристрої з обмеженням на послідовність виконання робіт, заданим орієнтованим ациклічним графом».

Ключові слова: узгоджене управління, активна система, багатозалежне лінійне програмування, теорія ПДС-алгоритмів, комбінаторна оптимізація, компромісний критерій.

Вступ. Проблема ефективного управління складними організаційно-виробничими системами, тобто системами з багаторівневою структурою, в яких об'єктом управління є люди, завжди існувала, існує і буде існувати [1, 2]. Зусилля вчених, що працюють в різних напрямках (філософії, соціології, економіки, прикладної математики) привели до загальноприйнятого висновку, що необхідною умовою ефективного функціонування таких систем є реалізація в якості основного закону планування роботи таких систем закону узгодженого планування, а необхідним допоміжним законом повинен бути закон контролю та штрафування (покарання) [3, 4].

Необхідною умовою реалізації закону узгодженого планування є парадигма, що інтереси організаційно-виробничих підсистем можуть не узгоджуватись між собою і системою в цілому та протидіяти в певних межах ефективному функціонуванню складної організа-

ційно-виробничої системи. Закон узгодженого планування на якісному рівні та в рамках строгої формалізації повинен розв'язати дві задачі [3–6]:

1. Структурними змінами, підбором ефективного менеджменту вищого рівня максимально можливо узгодити інтереси різних організаційно-виробничих підсистем, що складають ефективну складну організаційно-виробничу систему.

2. На строго формалізованому рівні реалізувати такий закон планування роботи кожної підсистеми, який би відповідав компромісу між ефективністю функціонування системи в цілому і локальними еґотистичними інтересами її підсистем.

Широко визнаною конструктивною математичною теорією, що дозволяє формалізувати розв'язок другої задачі є теорія активних систем проф. Буркова В. М, його учнів та послідовників [3–9].

© Павлов О. А., Кисельов М. Є., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Основною концепцією теорії активних систем є реалізація в якості основного закону узгодженого планування закону оптимального планування з прогнозом $\Sigma^{\text{опп}}$, який вводить такі штрафи для підсистем за невиконання планів, призначених центром, які дозволяють підсистемам в певних межах не виконувати план, реалізуючи свої власні інтереси. Основним конструктивним математичним результатом теорії активних систем є строге обґрунтування умов, що накладаються на функції штрафів елементів, при виконанні яких ефективність законів $\Sigma^{\text{опп}}$ та $\Sigma^{\text{опу}}$ (цілком узгодженого планування) є однаковими.

Закон планування $\Sigma^{\text{опу}}$ – це закон планування, в якому при заданих центром функціях штрафів елементам за невиконання планів центр вибирає плани, які вигідно виконувати елементам відповідно до інтегрального критерія – значення безумовного критерія ефективності функціонування елемента мінус штраф за невиконання плану. Значення цих результатів полягає в тому, що існують логічні з точки зору практичного використання класи функцій штрафів, що задовольняють цим теоретичним умовам.

Основна складність практичного використання математичної теорії активних систем полягає в необхідності розв'язання задачі, яку в спрощеному вигляді в термінах теорії активних систем можна сформулювати наступним чином.

$$\begin{aligned} & \max_{\pi} \Phi(\pi), \\ & \forall \pi_i \in Y_i, i = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (1)$$

що задовольняють умовам

$$h_i(\pi_i) \geq \max_{y_i \in Y_i} \{h_i(y_i) - \chi_i(\pi_i, y_i)\}, \quad (2)$$

де $\pi = \pi_1 \oplus \dots \oplus \pi_k$;

k – загальна кількість елементів складної організаційно-виробничої системи;

π_i – вектор плану, що повинен реалізувати i -й елемент;

$y_i \in Y_i$ – вектор, що може реалізувати i -й елемент замість плану π_i ;

$\chi_i(\pi_i, y_i) \geq 0$ – штраф для i -го елемента за невиконання плану π_i ;

$\Phi(\pi)$ – функціонал, що задає ефективність функціонування складної організаційно-виробничої системи.

Таким чином, компроміс між ефективністю функціонування складної організаційно-виробничої системи та інтересами її елементів досягається на основі заданих аналітичних виразів функцій штрафів $\chi_i(\pi_i, y_i)$, що може викликати певні незручності, не кажучи про нетривіальність розв'язання задачі (1)–(2), яка лише в деяких випадках зводиться до стандартної задачі математичного програмування.

В даній роботі пропонується математичний апарат, що реалізує методологічну парадигму теорії активних систем, що дозволяє в явному вигляді враховувати інтереси елементів, знаходячи конструктивний компроміс між інтересами організаційно-виробничої

системи та її елементів. Механізм покарання за невиконання планів, що є допоміжним в теорії узгодженого планування, в формальному аспекті реалізується за допомогою зміни значень додатних коефіцієнтів, від яких в явному вигляді залежить кількісна характеристика ступені врахування інтересів елементів організаційно-виробничої системи. На якісному рівні реакція центру на невиконання планів може реалізовуватись через заміну менеджерів – управлінців вищого рівня. Найбільш важлива і складна проблема – знаходження таких організаційних заходів, які б максимально узгоджували інтереси елементів і системи в цілому, – в даній роботі не розглядається.

1. Постановка задачі дворівневої організаційно-виробничої системи з повною інформованістю центра. На якісному рівні постановка задачі формально є частковим випадком постановки задачі теорії активних систем. Частковий випадок полягає в тому, що у дворівневу модель штрафи за невиконання планів елементами не вводяться. Тобто, центр має всі формальні оптимізаційні моделі з відповідними обмеженнями елементів, формалізований скалярний критерій ефективності організаційно-виробничої системи в цілому і повинен запропонувати елементам плани до виконання, які б реалізовували сформульований в явному вигляді компроміс інтересів – одне з множини запропонованих авторами таких компромісних рішень.

2. Лінійна модель дворівневої організаційно-виробничої системи з повною інформованістю центра. 2.1. Перша лінійна модель організаційно-виробничої системи. Модель l -го, $l = \overline{1, m}$, елемента організаційно-виробничої системи:

$$\min c_l^T y_l, \quad (3)$$

$$A^l y_l \leq b_l, 0 \leq b_l^1 \leq y_l \leq b_l^2, j = \overline{1, n_l},$$

$$y_l = (y_{l1}, \dots, y_{ln_l})^T, l = \overline{1, m}, \quad (4)$$

де y_{lj} – компонента вектору плану y_l , який центр задає l -му елементу;

c_l – вектор коефіцієнтів лінійного функціоналу (3), що формалізує відношення l -го елемента до плану y_l , заданого центром;

$b_l \geq \bar{0}$ – ресурсні обмеження.

Матриця A^l задається технологією виробництва. Якщо компоненти вектору $b_{lj}^1 > 0$, то вони можуть трактуватись, як технологічне обмеження (на даному виробничому циклі виробництво одиниці продукту не може бути менше b_{lj}^1 чи обмеження, що впливає з умови входження l -го елемента в організаційно-виробничу систему. Таким чином, вектор плану y_l , що повністю відповідає інтересам l -го елемента, є оптимальним розв'язком задачі лінійного програмування (ЛП) (3)–(4), в якій змінними є компоненти плану y_l .

Примітка 1. В задачах ЛП

$$\max_x c^T x, Ax \leq b = \min_x (-c)^T x, Ax \leq b.$$

Критерій якості функціонування організаційно-виробничої системи на даному виробничому циклі задається як

$$\min_{y_l} \sum_{l=1}^m d_l^T y_l, \quad (5)$$

де фіксовані значення компонент вектору $d_l, l = \overline{1, m}$, задаються центром.

Таким чином, перша лінійна модель організаційно-виробничої системи при знаходженні центру компромісного рішення (знаходження планів y_l , що враховують інтереси всіх елементів) декомпозується на m окремих підзадач.

2.2. Друга лінійна модель організаційно-виробничої системи. Лінійна модель l -го елемента, $l = \overline{1, m}$, має вигляд:

$$\min c_l^T y_l^*, \quad (6)$$

$$A^l (y_l + y_l^*) \leq b_l, 0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq y_{ij}^* \leq b_{ij}^2, \\ j = \overline{1, n_l}, l = \overline{1, m}, \quad (7)$$

Компоненти матриці A^l , вектори b_l , b_l^1 мають те саме трактування, як і в першій лінійній моделі l -го елемента. Компоненти вектору y_l^* є приватною власністю l -го елемента, і саме значення його компонент однозначно задають значення критерія (6), що виражає інтерес l -го елемента в виконанні плану y_l , заданого центром. Критерій якості організаційно-виробничої системи задається виразом (5).

Як і перша лінійна модель, друга при знаходженні центру планів $y_l, l = \overline{1, m}$, що враховують інтереси елементів, декомпозується на m окремих підзадач.

2.3. Третя лінійна модель організаційно-виробничої системи є узагальненням першої та другої лінійної моделі та полягає в тому, що модель l -го елемента, $l = \overline{1, m}$, може бути першою чи другою лінійною моделлю. Третя лінійна модель організаційно-виробничої системи при знаходженні центру компромісного рішення також декомпозується на m окремих підзадач.

3. Комбінаторна модель організаційно-виробничої системи. Виробнича модель k -го елемента, $k = \overline{1, m}$, агрегується в один пристрій. Множина можливих планів виробництва інтерпретується як множина всіх допустимих розкладів робіт $\sigma_k \in \{i_1, \dots, i_{n_k}\}$, $j = \overline{1, n_k}, k = \overline{1, m}$, де i_j – номер роботи, що займає в розкладі σ_k j -ту позицію, l_{kj} – час виконання j -ї роботи на пристрої. При цьому j -та робота інтерпретується як j -та серія однотипних виробів, а l_{kj} однозначно задає величину j -ї серії. Кожна j -та серія розбивається на дві множини. Перша множина виробів належить системі в цілому, друга – k -му елементу. Тобто, $l_{kj} = l_{kj}^1 + l_{kj}^2$, $l_{kj}^1 = \alpha l_{kj}$, $l_{kj}^2 = (1 - \alpha)l_{kj}$, $0 \leq \alpha \leq 1$. Пропорцію α задає центр, α враховує інтерес k -го

елемента. Роботи виконуються на пристрої без переривань. На порядок виконання робіт в довільному розкладі σ_k накладається технологічне обмеження, що задається орієнтованим ациклічним графом. Нехай $t = 0$ – умовний момент початку роботи пристрою. Тоді, відповідно до [10], задаємо

$$T_k > \sum_{j=1}^{n_k} l_{kj}.$$

Безумовний критерій ефективності роботи k -го виробництва має вигляд

$$\max_{\sigma_k} \sum_{j=1}^{n_k} \omega_{kj}^{en}(T_k)(T_k - C_{kj}(\sigma_k)) \Rightarrow \\ \Rightarrow \min_{\sigma_k} \sum_{j=1}^{n_k} \omega_{kj}^{en}(T_k) C_{kj}(\sigma_k), \quad (8)$$

де $\omega_{kj}^{en}(T_k) > 0$ – вагові коефіцієнти;

$C_{kj}(\sigma_k)$ – момент завершення виконання k -м пристроєм j -ї роботи.

Значення вагових коефіцієнтів $\omega_{kj}^{en}(T_k)$ задаються експертами k -го елемента. Сформульована модель k -го елемента є NP-складною задачею комбінаторної оптимізації. Її ефективний розв'язок (ПДС-алгоритм) наведений в [10]. Критерій організаційно-виробничої системи в цілому має вигляд

$$\sum_{k=1}^m \max_{\sigma_k} \sum_{j=1}^{n_k} \omega_{kj}^{en}(T_k)(T_k - C_{kj}(\sigma_k)) \Rightarrow \\ \Rightarrow \sum_{k=1}^m \min_{\sigma_k} \sum_{j=1}^{n_k} \omega_{kj}^{en}(T_k) C_{kj}(\sigma_k), \quad (9)$$

де $\omega_{kj}^{en}(T_k) > 0$ – вагові коефіцієнти, що задаються центром.

Задача знаходження компромісного рішення для наведеної моделі очевидним чином декомпозується на m незалежних підзадач.

4. Загальна декомпозиційна дворівнева модель організаційно-виробничої системи. Узагальнення декомпозиційної моделі полягає в тому, що модель кожного елемента системи може бути однією з трьох розглянутих вище моделей елемента – першою, другою, п'ятою. Критерій ефективності центра – це сума відповідних критеріїв, кожен з яких задається вибраною моделлю кожного елемента. Всі наведені нижче результати є наслідком наукових положень, викладених в [10–12].

5. Компромисні критерії та відповідні ним алгоритми узгодженого планування для дворівневої декомпозиційної моделі організаційно-виробничої системи. 5.1. Перша лінійна модель елемента. Компромисні критерії узгодженого планування та відповідні ним задачі ЛП. Перший компромісний критерій. Центр задає l -му елементу план y_l^1 , що задовольняє наступній умові:

$$y_l^1 = \arg \min_{y_l} d_l^T y_l, A^l y_l \leq b_l, \quad (10)$$

$$0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l},$$

$$y_l = (y_{l1}, \dots, y_{ln_l})^T, y_l^1 = \arg \min_{y_l \in \{y_l^1\}} c_l^T y_l, \quad (11)$$

де $\{y_l^1\}$ – множина всіх оптимальних розв'язків задачі ЛП (10). Нехай

$$f_{\text{opt}}^u = \min_{y_l} d_l^T y_l, A^l y_l \leq b_l,$$

$$0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l}. \quad (12)$$

Тоді y_l^1 є розв'язком довільної з двох наступних задач ЛП.

Перша задача ЛП:

$$y_l^1 = \arg \min_{y_l} c_l^T y_l, A^l y_l \leq b_l, 0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2,$$

$$d_l^T y_l = f_{\text{opt}}^u, j = \overline{1, n_l}, l = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Друга задача ЛП:

$$y_l^1 = \arg \min_{y_l} \{a(d_l^T y_l) + c_l^T y_l\}, A^l y_l \leq b_l,$$

$$0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l}. \quad (14)$$

Примітка 2. В [11] показано, що таке велике, але обмежене число $a > 0$ завжди існує.

Примітка 3. Перша задача ЛП містить додаткове обмеження $d_l^T y_l = f_{\text{opt}}^u$, в другій задачі ЛП число a треба вибирати надлишково великим.

Другий компромісний критерій і відповідна йому задача ЛП. Центр задає l -му елементу, $l = \overline{1, m}$, план y_l^2 , що задовольняє умові:

$$y_l^2 = \arg \min_{y_l} d_l^T y_l, A^l y_l \leq b_l, 0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2,$$

$$j = \overline{1, n_l}, c_l^T y_l - f_{\text{opt}}^{\text{en}} \leq \Delta_l > 0, \quad (15)$$

де

$$f_{\text{opt}}^{\text{en}} = \min_{y_l} c_l^T y_l, A^l y_l \leq b_l,$$

$$0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l}.$$

Експертне обмеження $\Delta_l, l = \overline{1, m}$, є кількісною мірою врахування центром інтересів l -го елемента, а саме,

$$c_l^T y_l - f_{\text{opt}}^{\text{en}} \leq \Delta_l. \quad (16)$$

Третій компромісний критерій, що реалізується ітераційною процедурою:

$$y_l^3 = \arg \min_{y_l} \{d_l^T y_l f_{\text{opt}}^u + \omega(c_l^T y_l - f_{\text{opt}}^{\text{en}})\},$$

$$A^l y_l \leq b_l, 0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l}, l = \overline{1, m}, \quad (17)$$

де $\omega > 0$ – ваговий коефіцієнт, що враховує інтереси l -го елемента.

В силу [11] y_l^3 є розв'язком задачі ЛП

$$y_l^3 = \arg \min_{y_l} \{(d_l^T + \omega c_l^T) y_l\},$$

$$A^l y_l \leq b_l, 0 \leq b_{ij}^1 \leq y_{ij} \leq b_{ij}^2, j = \overline{1, n_l}.$$

Якщо $d_l^T y_l^3 \neq f_{\text{opt}}^u, c_l^T y_l^3 \neq f_{\text{opt}}^{\text{en}}$, то для $\Delta\omega > 0$ виконується

$$d_l^T y_l^{3,\omega} < d_l^T y_l^{3,\omega+\Delta\omega}, c_l^T y_l^{3,\omega} > c_l^T y_l^{3,\omega+\Delta\omega}, \quad (18)$$

для $\Delta\omega < 0$:

$$d_l^T y_l^{3,\omega} > d_l^T y_l^{3,\omega+\Delta\omega}, c_l^T y_l^{3,\omega} < c_l^T y_l^{3,\omega+\Delta\omega}. \quad (19)$$

Для третього компромісного критерія умови (18)–(19) дозволяють реалізувати ітераційну процедуру для знаходження остаточного компромісного рішення.

5.2. Друга лінійна модель елемента. Для другої лінійної моделі центр може реалізовувати довільний з трьох компромісних критеріїв, розглянутих в п. 4.1 з наступними змінами:

1. Обмеження (4) всюди замінюються на обмеження (7).
2. Всюди $c_k^T y_k$ замінюються на $c_k^T y_k^*$ та

$$f_{\text{opt}k}^{\text{en}} = \min_{y_k} c_k^T y_k^*, A^k (y_k + y_k^*) \leq b_k,$$

$$0 \leq b_{kj}^1 \leq y_{kj} \leq b_{kj}^2, y_{kj} + y_{kj}^* \leq b_{kj}^2, y_{kj}^* \geq 0, j = \overline{1, n_k}.$$

5.3. Компромісний критерій для комбінаторної моделі елемента організаційно-виробничої системи. Модель п. 3 є дискретною NP-складною задачею комбінаторної оптимізації, і додавання к її обмеженням на послідовність виконання робіт у вигляді орієнтованого ациклічного графа будь-якого іншого обмеження перетворює її розв'язання в повний перебір всіх можливих розкладів. Таким чином, компромісні критерії та алгоритми знаходження компромісного рішення повинні враховувати це обмеження.

Перший компромісний критерій для l -го елемента задається наступними вимогами.

$$\sigma_l^1 = \arg \min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^u(T_l) C_{lj}(\sigma_l), \quad (20)$$

$$\sigma_l^1 = \arg \min_{\sigma_l \in \{\sigma_l^1\}} \sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^{\text{en}}(T_l) C_{lj}(\sigma_l), \quad (21)$$

де $\{\sigma_l^1\}$ – множина розв'язків задачі (20).

Алгоритм знаходження σ_l^1 полягає в наступному. Знаходиться

$$f_{\text{opt}l}^u = \min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^u(T_l) C_{lj}(\sigma_l) \quad (22)$$

ПДС-алгоритмом [10]. Далі тим же ПДС-алгоритмом розв'язується задача з функціоналом

$$\min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} (a \cdot \omega_{lj}^n(T_l) + \omega_{lj}^{en}(T_l)) C_{lj}(\sigma_l), \quad (23)$$

де $a > 0$ – достатньо велике число таке, що оптимальний розв'язок задачі (24) є одночасно оптимальним розв'язком задачі (23). В силу [12] таке обмежене число $a > 0$ завжди існує.

Другий компромісний критерій. На першому кроці знаходяться

$$\begin{aligned} f_{opt}^n &= \min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^n(T_l) C_{lj}(\sigma_l), \\ f_{opt}^{en} &= \min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^{en}(T_l) C_{lj}(\sigma_l). \end{aligned} \quad (24)$$

Другий компромісний критерій має вигляд

$$\begin{aligned} \sigma_l^2 = \arg \min_{\sigma_l} & \left\{ a_1 \left[\sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^n(T_l) C_{lj}(\sigma_l) - f_{opt}^n \right] + \right. \\ & \left. + a_2 \left[\sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^{en}(T_l) C_{lj}(\sigma_l) - f_{opt}^{en} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (25)$$

де $a_1 \geq 0, a_2 > 0$ – змінні коефіцієнти.

Відповідна задача комбінаторної оптимізації має вигляд

$$\min_{\sigma_l} \sum_{j=1}^{n_l} [a_1 \omega_{lj}^n(T_l) + a_2 \omega_{lj}^{en}(T_l)] C_{lj}(\sigma_l).$$

Рекурентна процедура полягає в тому, що фіксуємо значення $a_1 \vee a_2$ і змінюючи значення відповідного коефіцієнта, відповідно до [12] можна управляти зміною значень різниць

$$\sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^n(T_l) C_{lj}(\sigma_l^2) - f_{opt}^n \quad (26)$$

чи

$$\sum_{j=1}^{n_l} \omega_{lj}^{en}(T_l) C_{lj}(\sigma_l^2) - f_{opt}^{en}, \quad (27)$$

відповідно.

5.4. *Компромісне рішення для дворівневої зв'язної моделі (перша лінійна модель елемента).* В цій дворівневій моделі компоненти невід'ємних векторів b_l є змінними, на які накладається обмеження $\sum_{l=1}^m b_l \leq b$. Пропонується наступне компромісне рішення:

$$y^1 = (y_1, \dots, y_l)^T = \arg \max_{y_l, b_l, l=1, m} \sum_{l=1}^m (-d_l)^T y_l,$$

$$A^l y_l \leq b_l, \sum_{l=1}^m b_l \leq b, 0 \leq b_l^1 \leq y_l \leq b_l^2,$$

$$j = \overline{1, n_l}, (-c_l)^T y_l \geq f_l, l = \overline{1, m}, \quad (28)$$

де значення $f_l, l = \overline{1, m}$, задається центром.

Примітка 4. Це компромісне рішення очевидно узагальнюється на другу лінійну модель l -го елемента, $l = \overline{1, m}$.

Примітка 5. Запропонований критерій може бути узагальнений [11] на випадок, коли в допустимому розв'язку дозволяється порушувати обмеження

$$(-c_l)^T y_l \geq f_l, l = \overline{1, m}. \quad (29)$$

Висновки. 1. Розглянута в якісному та формальному аспектах проблематика реалізації узгодженого планування та його часткового випадку – формальних методів теорії активних систем.

2. Введені оригінальні формальні моделі дворівневої організаційно-виробничої системи.

3. Для кожного типу моделі запропоновані нові компромісні критерії, що реалізують парадигму узгодженого планування та конструктивні алгоритми їх реалізації.

4. Відмінність запропонованого рішення від існуючих полягає в тому, що воно дозволяє в явному вигляді враховувати при плануванні роботи елементами, що складають дворівневу організаційно-виробничу систему, їх власні інтереси.

Список використаної літератури

- Hu Y., Guan Y., Han J., Wen J. Joint optimization of production planning and capacity adjustment for assembly system. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 62. P. 193–198. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.029
- Dhungana D., Haselböck A., Meixner S., Schall D., Trabesinger S., Wallner S. Multi-factory production planning using edge computing and IIoT platforms. *Journal of Systems and Software*. 2021. Vol. 182, No. 111083. DOI: 10.1016/j.jss.2021.111083
- Burkov V. N., Tsyganov V. V. Stochastic mechanisms of the active systems functioning. *IFAC Proceedings Volumes*. 1986. Vol. 19, Iss. 5. P. 323–327. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)59817-1
- Burkov V. N. Active systems theory and organizational mechanisms design. *IFAC Proceedings Volumes*. 1989. Vol. 22, Iss. 10. P. 17–22. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)53140-7
- Avdeev V. P., Burkov V. N., Enaleev A. K., Kiseliova T. V. Adaptive identification in multichannel active systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 1989. Vol. 22, Iss. 16. P. 337–339. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)53035-9
- Burkov V. N., Enaleev A. K. Stimulation and decision-making in the active system theory: Review of problems and new results. *Mathematical Social Sciences*. 1994. Vol. 27, Iss. 3. P. 271–291. DOI: 10.1016/0165-4896(93)00739-h
- Arslanov M. Z. Multiobjective optimisation and binary relations in active system theory. *IFAC Proceedings Volumes*. 1999. Vol. 32, Iss. 2. P. 6282–6285. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)57072-x
- Arslanov M. Z. Scalarization of the problem of constructing a set of Slater-optimal solutions. *Автоматика и телемеханика*. 1997. Вып. 8. С. 138–144.
- Sagyngaliev K. S., Pachin S. T., Sanbayev Kh. Kh. Optimization of coordinated control of active systems. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control*. 1990. Vol. 2, No. 687436. P. 867–869. DOI: 10.1109/IMC.1990.687436
- Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. Algorithms and software of the four-level model of planning and decision making. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. Vol. 173. P. 407–518. DOI: 10.1007/978-3-319-98977-8_9
- Pavlov A. A. Models and algorithms of multipurpose linear programming. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, Iss. 11. P. 48–59. DOI: 10.1615/JAutomatInfSci.v52.i11.40

12. Pavlov A. A. Optimization for one class of combinatorial problems under uncertainty. *Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий наук.-техн. Збірник*. 2019. Том 1, № 34. С. 81–89. DOI: 10.20535/1560-8956.1.2019.178233

References (transliterated)

1. Hu Y., Guan Y., Han J., Wen J. Joint optimization of production planning and capacity adjustment for assembly system. *Procedia CIRP*. 2017, vol. 62, pp. 193–198. DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.029
2. Dhungana D., Haselböck A., Meixner S., Schall D., Schmid J., Trabesinger S., Wallner S. Multi-factory production planning using edge computing and IIoT platforms. *Journal of Systems and Software*. 2021, vol. 182, no. 111083. DOI: 10.1016/j.jss.2021.111083
3. Burkov V. N., Tsyganov V. V. Stochastic mechanisms of the active systems functioning. *IFAC Proceedings Volumes*. 1986, vol. 19, iss. 5, pp. 323–327. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)59817-1
4. Burkov V. N. Active systems theory and organizational mechanisms design. *IFAC Proceedings Volumes*. 1989, vol. 22, iss. 10, pp. 17–22. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)53140-7
5. Avdeev V. P., Burkov V. N., Enaleev A. K., Kiseliyova T. V. Adaptive identification in multichannel active systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 1989, vol. 22, iss. 16, pp. 337–339. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)53035-9
6. Burkov V. N., Enaleev A. K. Stimulation and decision-making in the active system theory: Review of problems and new results. *Mathematical Social Sciences*. 1994, vol. 27, iss. 3, pp. 271–291. DOI: 10.1016/0165-4896(93)00739-h
7. Arslanov M. Z. Multiobjective Optimisation and binary relations in active system theory. *IFAC Proceedings Volumes*. 1999, vol. 32, iss. 2, pp. 6282–6285. DOI: 10.1016/s1474-6670(17)57072-x
8. Arslanov M. Z. Scalarization of the problem of constructing a set of Slater-optimal solutions. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1997, iss. 8, pp. 138–144.
9. Sagyngaliev K. S., Pachin S. T., Sanbayev Kh. Kh. Optimization of coordinated control of active systems. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control*. 1990, vol. 2, no. 687436, pp. 867–869. DOI: 10.1109/IMC.1990.687436
10. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. Algorithms and software of the four-level model of planning and decision making. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2019, vol. 173, pp. 407–518. DOI: 10.1007/978-3-319-98977-8_9
11. Pavlov A. A. Models and algorithms of multipurpose linear programming. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020, vol. 52, iss. 11, pp. 48–59. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v52.i11.40
12. Pavlov A. A. Optimization for one class of combinatorial problems under uncertainty. *Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий наук.-техн. збірник*, 2019. Том 1, № 34, С. 81–89. DOI: 10.20535/1560-8956.1.2019.178233

Надійшла (received) 05.11.2023

UDC 519.24

A. A. PAVLOV, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, Professor of Informatics and Software Engineering Department; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

M. Y. KYSELOV, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Bachelor of Informatics and Software Engineering Department, Kyiv, Ukraine, e-mail: zeusmobilenick@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3686-3419>

MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF COORDINATED PLANNING

Modern processes of globalization and economic competition require a significant increase in the requirements for the professional degree of top-level managers who manage the activities of international corporations, regional economies, branch ministries, etc. Their efficient operation is impossible without the use of basic scientific developments and appropriate software which implement the main qualitative law of complex organizational and production systems management: the law of coordinated management (planning), when management decisions at the top level take into account interests that may not coincide, or even be antagonistic in organizational and production subsystems connected by a certain structure of mutual relations within a single organizational and production complex system. In this work, we consider a two-level organizational and production system, which in terms of the generally known theory of active systems is defined as “decision-making center → elements (of an organizational and production subsystem)”. We consider formal models of elements of two classes, linear continuous and discrete, aggregated production models which belong to the same class of NP-hard single-stage scheduling problems. For both types of element models, we give compromise criteria and corresponding methods of constructing compromise solutions based on the results of Prof. A. A. Pavlov for multi-objective linear programming, as a result of his theoretical research for discrete optimization problems under uncertainty, and the theory of PSC-algorithms created by him and his students, that is, algorithms containing polynomial complexity subalgorithms for constructing feasible solutions that satisfy theoretically substantiated sufficient signs of optimality. In this work, we use the PSC-algorithm for the NP-hard scheduling problem “Minimization of the total weighted completion time of jobs on a single machine with precedence relations given by a directed acyclic graph”.

Keywords: coordinated management, active system, multi-objective linear programming, theory of PSC-algorithms, combinatorial optimization, compromise criterion.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Павлов Олександр Анатолійович, Pavlov Alexander Anatolievich

Автор 2 / Author 2: Кисельов Микита Євгенович, Kyselov Mykyta Yevhenovych

D. A. GOBOV, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Senior lecturer of the Department of Computer Science and Software Engineering of the Faculty of Informatics and Computer Science, Kyiv, Ukraine., e-mail: d.gobov@kpi.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9964-0339>
O. V. ZUIEVA, Candidate of Economic Sciences (Ph.D.), Analytics Consultant at CS ltd. Kharkiv, Ukraine, e-mail: olekszueva@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9661-9657>

EXAMINING SOFTWARE QUALITY CONCEPT: BUSINESS ANALYSIS PERSPECTIVE

Software quality is a critical aspect of software development that significantly impacts business performance and customer satisfaction. However, defining software quality can be challenging, as different sources provide various definitions and perspectives. The article presents a literature review of software quality, acknowledging an ongoing debate over the years regarding the definition of software quality and the methods used for its assessment. Among all the different ideas about software quality, the article highlights key concepts that are crucial in understanding software quality: meeting requirements, satisfying users, using software features, and spotting defects. The article also checks out international standards like ISO/IEC 25010:2011 and ISO/IEC 5055:2021, introducing terms such as "Quality in use" and "Structural Quality." Unveiling a tripartite perspective elucidated in international standards—internal quality, external quality, and quality in use - the article underscores the intricate interplay between subjectivity and objectivity. The subjective dimension, influenced by user perception and contextual factors, is juxtaposed with more objective criteria such as conformance to requirements and the absence of defects. The standards provide helpful perspectives, but the human side of things, like user feelings and specific contexts, makes finding a universal definition tricky. The pivotal role of business analysis and requirements engineering in ensuring software quality is underscored. Business requirements, stakeholder needs, and the quality of functional and non-functional requirements emerge as integral components. The article argues that software quality is intricately tied to the quality of its requirements, presenting a dual perspective: compliance with quality criteria and alignment with stakeholders' expectations and business goals. Practical software quality assessment is built upon the foundational understanding of contextual nuances, user needs, and operational conditions, all discerned through business analysis.

Keywords: software quality, business analysis, requirements, quality in use, internal quality, international standards.

Introduction. The question of assuring quality is always essential in the world of technology. Since people started automating their work, ensuring the quality of these automated tools has been a significant concern. It's hard to imagine any organization aiming to produce low-quality products because quality significantly impacts business performance and customer satisfaction [1]. The quality of software solutions can substantially affect organizations' financial performance and projects' overall success. According to the Consortium for Information & Software Quality (CISQ), in 2020, the total Cost of Poor Software Quality in the US reached \$2.08 trillion [2].

In [3], the author analyzed 15468 publications starting from the year 1954 and concluded that the interest in the topic of software quality is growing exponentially. According to the results obtained in [3], most research is dedicated to the software development process, advanced software engineering, software architectures, quality evaluation, software testing, machine learning, and data mining. It is noteworthy that, as indicated by the study's findings [3], there was a noticeable shift in focus during the late 2000s towards topics such as quality assurance in the early stages of software development life cycles and software process improvement. This underscores the increasing significance of these identified subject areas. In the ISO/IEC/IEEE 12207:2017 standard [4], it is mentioned that the initial stages of the software development technical process involve the identification and analysis of requirements. One of the typical stages for a software system is "exploration", which is facilitated by business analysis tools. Consequently, the quality assurance process should commence from this very initial stage. Software quality is a critical characteristic that software engineers

must choose and document at the outset of a project during the requirements definition process [5].

In organizing any process, including the evaluation and assurance of software quality, it is imperative to establish clear boundaries and objectives essential for achieving the desired outcomes. Developing a conceptual framework serves as a vital tool for delineating these boundaries. In essence, to establish effective processes for the assessment and assurance of quality, defining the concept of "Software Quality" is crucial. However, defining software quality can be complex, as different sources provide various definitions and perspectives.

Literature review and problem statement. As previously mentioned, a considerable body of literature is dedicated to examining software quality. However, the majority of works primarily center attention on models and methodologies for assessment, relying upon the definitions outlined in international standards. For example, in the [6], the authors explore the significance of software quality in connection with risk evaluation and security considerations. The article offers an examination of ISO standards pertaining to software quality and the advantages they offer to promote the utilization of software quality standards within the industry. In [7], the authors identified three fundamental dimensions for determining software quality: a set of quality factors, user satisfaction, and unexpected software performance or errors. Nonetheless, the primary emphasis of the work remains dedicated to the software quality measurement. The article [8] explores the evolving perspectives on software quality and their influence within the software engineering community. The authors acknowledge an ongoing debate over the years regarding the definition of software quality and the methods used for its

© Gobov D. A., Zuiueva O. V., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Commons [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



assessment. Furthermore, they investigate variations in the emphasis placed on quality attributes within both research and practical application. The authors aim to identify the quality traits that practitioners consider crucial when assessing the quality of code snippets. Furthermore, the authors observe disparities in the evolution of the six quality attributes within software quality models over the past four decades.

The authors' focus on individual components, characteristics, and aspects of assessing software quality underscores the complex nature of studying this concept at a more general level. Karl Wieggers, as referenced in [9, p. 189], acknowledges that no comprehensive yet concise definition of Quality universally applies to software. He presents a segment of the definition of "Quality" from The American Society for Quality (2021a), which describes it as "A subjective term for which each person or sector has its own definition". The whole definition also includes practical aspects: "In technical usage, quality can have two meanings: 1) the characteristics of a product or service that bear on its ability to satisfy stated or implied needs; 2) a

product or service free of deficiencies. According to Joseph Juran, quality means "fitness for use"; according to Philip Crosby, it means "conformance to requirements" [10]. However, in the sixth edition of Juran's Quality Handbook, Joseph Juran and Joseph De Feo redefine it as "fitness for purpose" and highlight, "we must first agree on a meaning of the word so that an organization will know how to manage "it" [11, p.5]. In the [12], the authors assert that the quality is contingent upon the context and the interpretation of quality attributes, as well as the interrelationship among these attributes within a specific context; it is neither substantive nor rational to posit that a single definition can universally fit the diverse needs of all stakeholder groups. Undoubtedly, the notion of quality is broad and subjective. However, this subjective aspect of software quality becomes apparent in practical applications, while at a conceptual level, common attributes can be identified. Therefore, **the purpose of the article** is to identify the essential characteristics inherent in the concept of software quality.

Table 1 – The definitions of the "Software Quality"

Author, source	Definition
Petrasch R. (1999) [13]	the existence of characteristics of a product which can be assigned to requirements. In addition to this, we have to look at the characteristics that are not related to requirements: characteristics, which reduce the software quality (contra-productive) and "neutral" characteristics, which are not relevant for quality.
Tian J. (2005) [14, p.25]	a) may include many different attributes and may be defined and perceived differently based on people's different roles and responsibilities. b) high quality means none or few problems of limited damage to customers.
Nuseibeh B., Easterbrook S.M. (2007) [15]	a) fitness for purpose; b) an attribute of the relationship between software and the purpose for which it is used.
Juran J. M., De Feo J. A. (2010) [11]	a) features of product that meet customer needs and freedom from failures (p. 6) b) degree to which an inherent characteristic fulfills requirements (p. 1056).
Hossain A., Dr. Md. Kashem A., Sultana S. (2013) [16]	High levels of user satisfaction and low defect levels, often associated with low complexity.
Suman, Wadhwa M. (2014) [17]	conformance to explicitly state functional and performance requirements, explicitly documented development standards and implicit characteristics that are expected of all professionally developed software.
Alebeisat F., Alhalhouli Z., Alshabat T., Alrawashdeh T.I. (2018). [7]	Product attribute that meets the stringent performance and functional requirements, specific development criteria, and inherent functions that all professionally designed software must have.
Hussain S., Farid S., Mumtaz I. (2019) [12]	conformance to predefined specifications that meet the customers' needs i.e. perception of a user or customer that up to what extent the software product meets their need and expectations.
ANSI/ASQC A3. (1978) [18]	the totality of features and characteristics of a product or a service that bears on its ability to satisfy the given needs
ANSI/ IEEE Std 729-1983 [19]	a) The totality of features and characteristics of a software product that bear on its ability to satisfy given needs: for example, conform to specifications. b) The degree to which software possesses a desired combination of attributes. c) The degree to which a customer or user perceives that software meets his or her composite expectations. d) The composite characteristics of software that determine the degree to which the software in use will meet the expectations of the customer"
IEEE Std 610.12-1990 [20]	a) The degree to which a system, component, or process meets specified requirements. b) The degree to which a system, component, or process meets customer or user needs or expectations.
ISO / IEC 25010 : 2011 [21]	degree to which a software product satisfies stated and implied needs when used under specified conditions.
ISO 9000:2015 [22]	the degree to which a set of inherent characteristics (existing in object) of an object (e.g., system, product) fulfills requirements (need or expectation that is stated, generally implied or obligatory). The term "quality" can be used with adjectives such as poor, good or excellent.

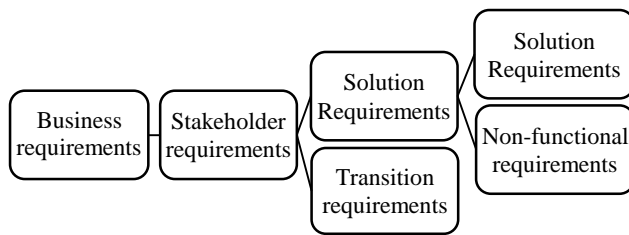


Fig. 1. Requirements classification scheme

Analysis and results. Table 1 reviews several definitions of the concept of "Software Quality" as presented in the existing scientific literature and international standards. In addition to the definitions presented in Table 1, ISO/IEC 25010:2011 [21] defines the concept of "Quality in use" as the degree to which specific users can use a product or system to meet their needs to achieve specific goals with effectiveness, efficiency, freedom from risk and satisfaction in specific contexts of use. Furthermore, ISO/IEC 5055:2021 [23] introduces the term "Structural Quality" as the degree to which a set of static attributes of a software product satisfies stated and implied needs for the software product to be used under specified conditions – a component of software quality. The standard also introduces the term "Internal Software Quality," characterizing the degree to which a set of static attributes of a software product satisfies stated and implied needs for the software product to be used under specified conditions.

Analyzing the diverse array of definitions provided, it becomes evident that international standards define Software Quality as a "degree" that can be good, poor, or excellent. In contrast, the authors' definitions revolve around terms such as "conformance," "fitness," "existence of characteristics," and "attributes." It should be noted that words like "conformance" and "fitness" can also be qualified with adjectives like "high" or "low," thus indicating a level or degree.

A comprehensive analysis of these definitions reveals several key concepts associated with the delineation of Software Quality:

1. Conformance to requirements or specifications - Software Quality relates to how well the software meets specific functional and performance criteria, whether explicitly stated or implicitly expected.

2. Customer or user perception of satisfaction needs and expectations - Software Quality depends on how users or customers feel about the software and whether it meets their needs and expectations.

3. Set of features, attributes, and characteristics of a software product - it's about the attributes and characteristics that affect the software's ability to do what it's supposed to do.

4. Existence of defects, problems, and damage - the presence of defects and problems in the software can affect its quality.

5. Specified conditions or context – the context and conditions under which the software is used also play a significant role in determining its quality, influencing the requirements and feelings of the user.

Points 2 and 5 introduce a subjective dimension to the concept of Software Quality. They emphasize the human

element, which acknowledges that what one person or group of users considers "good" or "excellent" may differ from the opinions of others and that quality can be influenced by the unique circumstances in which the software is employed. On the other hand, the remaining points, 1, 3, and 4, strive to objectify the concept by establishing more concrete criteria for evaluation.

It is worth noting that all of the above concepts, in one form or another, refer to certain levels of software requirements, which were the central element of business analysis [24]. The business analysis body of knowledge [25] proposed the following requirements classification scheme that can be applied to software as well (fig. 1):

Considering that business requirements describe the higher-level needs of the organization and measurable representations of goals the business is seeking to achieve [26]. This type of requirement is mentioned in the software quality definition according to [12, 15, 18, 19, 20, 21, 22,]. It allows quality assessment not from a particular user perspective but from the whole enterprise, a business area, or a specific initiative point of view.

At the same time, business requirements can not be achieved if stakeholder requirements are not met. In doing so, business requirements provide the context boundaries for identifying stakeholder requirements in the form of a problem to be solved or an opportunity to be realized. User needs satisfaction as conditions of software quality are mentioned in [11, 12, 16, 19, 20].

Functional requirements, which describe software behavior, and non-functional requirements, which describe conditions under which a solution must remain effective or qualities that a solution must have, are mentioned in the software quality definitions in [7, 10, 12, 13, 18, 19, 20, 22]. Some sources give special attention to non-functional requirements. For example, the quality model proposed in [21] includes eight categories, seven of which relate to non-functional requirements. On this basis, it has even been suggested in [27] that software quality depends only to a relatively small extent on functional conformance. This statement should be recognized as erroneous since functional requirements cover the needs of stakeholders. Therefore, the product quality and non-functional requirements without implementing functional ones do not make sense. It is confirmed in particular by the quality in use model from [21].

Understanding quality as the implementation of a software product in accordance with a requirements specification [7, 12, 19, 20, 22] directly refers to paragraph 3 of the term "requirement" defined in the ISO standard [20]:

1. A condition or capability needed by a user to solve a problem or achieve an objective.

2. A condition or capability that must be met or possessed by a system or system component to satisfy a contract, standard, specification, or other formally imposed document.

3. A documented representation of a condition or capability as in 1 or 2.

It allows us to conclude that a software product's quality depends on the requirements' quality, which are usually created before the actual creation of the program

code begins. The quality of requirements can be discussed in two dimensions: compliance with quality criteria and compliance of requirements with stakeholders' expectations and business goals. The first is provided through requirements verification activities that aim to check whether the requirements are sufficiently defined and structured so that the development team can use them in the software solution's design, development, and implementation. The second one is provided through validation activities to ensure requirements support the delivery of the expected benefits to stakeholders. The fact that business, stakeholders, and functional/non-functional requirements are the main deliverables of business analysis tasks allows us to say that the quality of business analysis execution directly affects the quality of the software product. This conclusion is confirmed by the study [28], which shows that problems such as "Customer dissatisfaction/loss of trust", "Low quality of the product/service", and "Gap between end-user real needs and implemented functionality" are caused by problems in business analysis and requirements engineering activities.

Essentially, Software Quality emerges as a multifaceted concept that seamlessly integrates subjective and objective components. While the subjective aspect is linked to user experiences and the dynamic context of use, the objective elements aim to quantify and assess quality based on defined standards, inherent software attributes, and the absence of issues. This multifaceted nature underscores the need for each organization to identify which specific quality aspects are most significant. By doing so, organizations can tailor their quality assessments to align with their unique priorities and requirements, acknowledging that Software Quality is not a one-size-fits-all proposition.

The interplay between subjectivity and objectivity makes Software Quality a comprehensive concept encompassing diverse viewpoints, evaluation approaches, and models. The quality model outlined in international standards offers a tripartite perspective: internal quality, external quality, and quality in use. Internal Quality provides an insider's view of the software, focusing on characteristics typically accessible during development. External Quality takes an outsider's perspective, concentrating on properties related to the software's performance during execution. Quality in use relates to the practical application of the software in its operational environment, serving the needs of specified tasks performed by designated users. It's important to note that these three dimensions are interconnected. Internal quality influences external quality, which, in turn, impacts quality in use [5].

It's crucial to emphasize another significant notion here. The context and conditions under which software operates and the user's needs and expectations are defined through the business analysis process. These aspects are documented in business analysis artifacts and form the foundation for requirement formulation. Consequently, it becomes apparent that software quality cannot be measured unless the requirements are correctly understood [15]. Hence, requirements engineering plays a pivotal role in our capacity to comprehend and evaluate software quality. In essence, understanding the specific circumstances and user

needs forms the bedrock upon which software quality assessment is built.

Conclusions. The research aimed to identify the fundamental characteristics inherent in the concept of software quality. Drawing on ISO standards and diverse literature, five key concepts associated with defining Software Quality emerged: conformance to requirements or specifications, user perception of satisfaction needs and expectations, set of features, attributes, and characteristics of a software product, existence of defects, problems, and damage, and specified conditions or context. The synthesis of subjective and objective elements, along with the interconnected dimensions of the quality model, underscores the multifaceted nature of software quality. The analysis highlights that the intricate nature of software quality requires a nuanced approach, and a comprehensive understanding of contextual nuances, user needs, and operational conditions is imperative. The findings emphasize the pivotal role of business analysis and requirements engineering, particularly in the early development stages, shaping the software quality trajectory. Measuring software quality demands a thorough understanding of requirements; lacking a clear grasp of specifications and expectations makes accurately assessing software quality challenging. Essentially, the accuracy and completeness of requirements are fundamental for a practical evaluation of software quality and ensuring a high level of it.

In our [29] publication, we establish the influence of project context on the content of business analysis documents. As a result, our ongoing research will primarily focus on assessing the quality of requirements and business analysis activities as a whole while considering the context and examining how this, in turn, affects the overall quality of software.

References

1. Cvjetkovic M., Vasiljević M., Cvjetković M., Josimović M. Impact of quality on improvement of business performance and customer satisfaction. *Journal of Engineering Management and Competitiveness*. 2021. Vol. 11. P. 20–28. DOI: 10.5937/jemc2101020C.
2. Krasner H. *The Cost of Poor Software Quality in the US: A 2020 Report*. Consortium for Information and Software Quality. 2021. URL: <https://www.it-cisq.org/the-cost-of-poor-software-quality-in-the-us-a-2020-report> (date of access: 20.10.2023).
3. Kokol P. Software Quality: How Much Does It Matter? *Electronics*. 2022, no. 11(16), 2485. DOI: 10.3390/electronics11162485.
4. *ISO/IEC/IEEE 12207:2017. Systems and Software Engineering - Software Life Cycle Processes*. ISO/IEC/IEEE International Standard. 2017. 145 p.
5. April A., Laporte C. Y. An Overview of Software Quality Concepts and Management Issues. *Measuring Information Systems Delivery Quality*. 2006. P. 28-54. DOI: 10.4018/978-1-59140-857-4.ch002 (date of access: 25.10.2023).
6. Nyári N., Kerti A. Review of Software Quality Related ISO Standards. *Safety and Security Sciences Review*. 2021. Vol. 3, № 2. P. 61–72.
7. Alebeisat F., Alhalhouli Z., Alshabat T., Alrawashdeh T. I. Review of Literature on Software Quality. *World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT)*. 2018. Vol. 8, № 5. P. 32–42.
8. Ndukwe I. G., Licorish S. A., Tahir A., MacDonell S. G. How have views on Software Quality differed over time? Research and practice viewpoints. *Journal of Systems and Software*. 2023. Vol. 195. DOI: 10.1016/j.jss.2022.111524.

9. Karl Wiegers. *Software Development Pearls. Lessons from Fifty Years of Software Experience*. Addison-Wesley Professional, 2021. 330 p.
10. *Quality Glossary*. American Society for Quality. URL: <https://asq.org/quality-resources/quality-glossary> (date of access: 25.10.2023).
11. Joseph M. Juran; Joseph A. De Feo. *Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence, Sixth Edition*. McGraw-Hill, 2010. 1113 p.
12. Hussain S., Farid S., Mumtaz I. Is Customer Satisfaction Enough for Software Quality? *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*. 2019. Vol. 8, № 2. P. 40–47.
13. Petrasch R. The definition of software quality: a practical approach. *Proceedings of the 10th International Symposium on Software Reliability Engineering*. 1999. P. 33–34.
14. Tian J. *Software Quality Engineering: Testing, Quality Assurance, and Quantifiable Improvement*. IEEE. 2005, 412 p. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471722324> (date of access: 28.10.2023).
15. Nuseibeh B., Easterbrook S. M. *Fundamentals of Requirements Engineering*. Pearson Education Limited, 2007. 496 p.
16. Hossain A., Dr. Md. Kashem A., Sultana S. Enhancing Software Quality Using Agile Techniques. *IOSR Journal of Computer Engineering*. 2013. Vol. 10, № 2. P. 87–93.
17. Suman, Wadhwa M. A comparative study of software quality models. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2014. Vol. 5, № 4. P. 5634–5638.
18. ANSI/ASQC A3. *Quality systems terminology*. American National Standards Institute. Milwaukee, Wisconsin. 1978, 17 p.
19. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. ANSI/IEEE Std. 729-1983*. 1983, 38 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.1983.7435207. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7435205> (date of access: 28.10.2023).
20. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE Std 610.12-1990*. 1990, 83 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.1990.101064. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=2238> (date of access: 28.10.2023).
21. ISO/IEC 25010:2011. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*. 2011. URL: <https://www.iso.org/standard/35733.html> (date of access: 01.11.2023).
22. ISO 9000:2015. *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*. 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/45481.html> (date of access: 01.11.2023).
23. ISO/IEC 5055:2021. *Information technology – Software measurement – Software quality measurement – Automated source code quality measures*. URL: <https://www.iso.org/standard/80623.html> (date of access: 01.11.2023).
24. Gobov D., Yanchuk, V. Network Analysis Application to Analyze the Activities and Artifacts in the Core Business Analysis Cycle. *Proceedings of the 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*. 2021. P. 1-6. DOI: 10.1109/IISEC54230.2021.9672373.
25. *A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge*. International Institute of Business Analysis, 2015. 512 p.
26. *The PMI guide to business analysis*. Project Management Institute, 2017. 444 p.
27. Norbert, N., András, K. Review of software quality related ISO standards. *Safety and Security Sciences Review*. 2021. Vol. 3, №2. P. 61–72.
28. Gobov D., Titlova O. Towards identifying challenges in business analysis on IT projects—a practical study. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. Vol. 2. P. 193-206. DOI: 10.32620/reks.2023.2.16
29. Gobov D., Zuieva O. Identifying the dependencies between IT project context and business analysis document content. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023. Vol. 2, №24. P. 39–53. DOI: 10.30837/itssi.2023.24.039.
- Competitiveness. 2021, no. 11. pp. 20–28. DOI: 10.5937/jemc2101020C.
2. Krasner H. *The Cost of Poor Software Quality in the US: A 2020 Report*. Consortium for Information and Software Quality. 2021. Available at: <https://www.it-cisq.org/the-cost-of-poor-software-quality-in-the-us-a-2020-report> (accessed: 20.10.2023).
3. Kokol P. Software Quality: How Much Does It Matter? *Electronics*. 2022, no. 11(16), 2485. DOI: 10.3390/electronics11162485.
4. ISO/IEC/IEEE 12207:2017. *Systems and Software Engineering - Software Life Cycle Processes*. ISO/IEC/IEEE International Standard. 2017, 145 p.
5. April A., Laporte C. Y. An Overview of Software Quality Concepts and Management Issues. *Measuring Information Systems Delivery Quality*. 2006, pp. 28-54. Available at: <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-857-4.ch002> (accessed: 25.10.2023).
6. Nyári N., Kerti A. Review of Software Quality Related ISO Standards. *Safety and Security Sciences Review*. 2021, vol. 3, no. 2, pp. 61–72.
7. Alebeisat F., Alhalhouli Z., Alshabat T., Alrawashdeh T. I. Review of Literature on Software Quality. *World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT)*. 2018, vol. 8, no. 5, pp. 32–42.
8. Ndukwe I. G., Licorish S. A., Tahir A., MacDonell S. G. How have views on Software Quality differed over time? Research and practice viewpoints. *Journal of Systems and Software*. 2023, vol. 195. DOI: 10.1016/j.jss.2022.111524.
9. Karl Wiegers. *Software Development Pearls. Lessons from Fifty Years of Software Experience*. Addison-Wesley Professional, 2021. 330 p.
10. *Quality Glossary*. American Society for Quality. Available at: <https://asq.org/quality-resources/quality-glossary> (accessed: 25.10.2023).
11. Joseph M. Juran; Joseph A. De Feo. *Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence, Sixth Edition*. McGraw-Hill, 2010. 1113 p.
12. Hussain S., Farid S., Mumtaz I. Is Customer Satisfaction Enough for Software Quality? *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*. 2019, vol. 8, no. 2, pp. 40–47.
13. Petrasch R. The definition of software quality: a practical approach. *Proceedings of the 10th International Symposium on Software Reliability Engineering*. 1999, pp. 33–34.
14. Tian J. *Software Quality Engineering: Testing, Quality Assurance, and Quantifiable Improvement*. IEEE. 2005, 412 p. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471722324> (accessed: 28.10.2023).
15. Nuseibeh B., Easterbrook S. M. *Fundamentals of Requirements Engineering*. Pearson Education Limited, 2007. 496 p.
16. Hossain A., Dr. Md. Kashem A., Sultana S. Enhancing Software Quality Using Agile Techniques. *IOSR Journal of Computer Engineering*. 2013, vol. 10, no. 2, pp. 87–93.
17. Suman, Wadhwa M. A comparative study of software quality models. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2014, vol. 5(4), pp. 5634–5638.
18. ANSI/ASQC A3. *Quality systems terminology*. American National Standards Institute. Milwaukee, Wisconsin. 1978, 17 p.
19. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. ANSI/IEEE Std. 729-1983*. 1983, 38 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.1983.7435207. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7435205> (accessed: 28.10.2023).
20. *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE Std 610.12-1990*. 1990, 83 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.1990.101064. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=2238> (accessed: 28.10.2023).
21. ISO/IEC 25010:2011. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*. 2011. Available at: <https://www.iso.org/standard/35733.html> (accessed: 01.11.2023).
22. ISO 9000:2015. *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*. 2015. Available at: <https://www.iso.org/standard/45481.html> (accessed: 01.11.2023).
23. ISO/IEC 5055:2021. *Information technology – Software measurement – Software quality measurement – Automated source code quality measures*. Available at: <https://www.iso.org/standard/80623.html> (accessed: 01.11.2023).

References (transliterated)

1. Cvjetkovic M., Vasiljević M., Cvjetković M., Josimović M. Impact of quality on improvement of business performance and customer satisfaction. *Journal of Engineering Management and*

24. Gobov D., Yanchuk, V. Network Analysis Application to Analyze the Activities and Artifacts in the Core Business Analysis Cycle. *Proceedings of the 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*. 2021, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IISEC54230.2021.9672373.
25. A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge. International Institute of Business Analysis, 2015. 512 p.
26. *The PMI guide to business analysis*. Project Management Institute, 2017. 444 p.
27. Norbert, N., András, K. Review of software quality related ISO standards. *Safety and Security Sciences Review*. 2021, no. 3(2), pp. 61–72.
28. Gobov D., Titlova O. Towards identifying challenges in business analysis on IT projects—a practical study. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023, no.2, pp. 193-206. DOI: 10.32620/reks.2023.2.16
29. Gobov D., Zuieva O. Identifying the dependencies between IT project context and business analysis document content. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023, no. 2(24), pp. 39–53. DOI: 10.30837/itssi.2023.24.039.

Received 13.11.2023

УДК 004.41

Д. А. ГОБОВ, кандидат технічних наук (Ph.D), Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри інформатики та програмної інженерії факультету інформатики та обчислювальної техніки,

м. Київ, Україна; e-mail: d.gobov@kpi.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9964-0339>

О. В. ЗУЄВА, кандидат економічних наук (Ph.D), аналітик-консультант CS Ltd,

м. Харків, Україна, e-mail: olekszueva@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9661-9657>

АНАЛІЗ КОНЦЕПТУ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ПЕРСПЕКТИВА БІЗНЕС-АНАЛІЗУ

Якість програмного забезпечення є критичним аспектом розробки програмного забезпечення, який суттєво впливає на продуктивність бізнесу та задоволення клієнтів. Однак визначення якості програмного забезпечення може бути складним завданням, оскільки різні джерела надають різні визначення та погляди. У статті представлено огляд літератури з якості програмного забезпечення, підтверджуючи тривалу дискусію протягом років щодо визначення якості програмного забезпечення та методів його оцінки. Серед різних ідей про якість програмного забезпечення в статті виокремлено ключові концепції, які є важливими для розуміння поняття якості програмного забезпечення: відповідність вимогам, задоволення користувачів, функції програмного забезпечення та виявлення дефектів. В статті розглядаються міжнародні стандарти, такі як ISO/IEC 25010:2011 та ISO/IEC 5055:2021, в яких представлено терміни "Якість під час використання" та "Структурна якість". Розкриваючи трійковий погляд, який пояснюється в міжнародних стандартах - внутрішня якість, зовнішня якість та якість використання – в статті підкреслено тонку взаємодію між суб'єктивністю та об'єктивністю. Суб'єктивний вимір, визначений сприйняттям користувачів та факторами контексту, порівнюється з більш об'єктивними критеріями, такими як відповідність вимогам та відсутність дефектів. Стандарти надають слушний погляд, але людський аспект, такий як почуття користувача та конкретні фактори контексту, роблять надання універсального визначення поняття якості програмного забезпечення складним завданням.

Наголошується на надважливій ролі бізнес-аналізу та інженерії вимог у забезпеченні якості програмного забезпечення. Бізнес-вимоги, потреби зацікавлених сторін та якість функціональних та нефункціональних вимог виокремлюються як невід'ємні компоненти. В статті аргументовано, що якість програмного забезпечення тісно пов'язана з якістю його вимог, представляючи подвійну перспективу: відповідність критеріям якості та відповідність очікуванням зацікавлених сторін і цілям бізнесу. Отже, ефективна оцінка якості програмного забезпечення ґрунтується на фундаментальному розумінні нюансів контексту, потреб користувачів та умов експлуатації, все це визначається в процесі бізнес-аналізу.

Ключові слова: якість програмного забезпечення, бізнес-аналіз, вимоги, якість під час використання, внутрішня якість, міжнародні стандарти

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Гобов Денис Андрійович, Gobov Denys Andriyovych

Автор 2 / Author 2: Зуєва Олександра Валерівна, Zuieva Oleksandra Valerivna

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.03

UDC 004.89

K. V. YAGUP, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies;

Kharkiv, Ukraine; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>

V. G. YAGUP, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, Professor at the Department of Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yagup.walery@gmail.com;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

APPLICATION OF BAYESIAN REGULARIZATION FOR IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

The possibility of using neural networks in the field of the energy coefficients correction of a power supply system with uneven load in phases is being studied. This need is justified by the fact, that the calculation of the necessary parameters of the symmetry-compensating device was previously based on the Nelder – Mead search optimization method. Search optimization performing is computationally expensive, takes long computation times, and may calculate anomalous values. The article develops the idea of using technology for predicting the parameters of a symmetry-compensating device, based on neural network modeling using Bayesian regularization. For a given set of initial data, the best selected configuration turned out to be a neural network of two layers, implemented in the MATLAB package using the machine learning tool Neural Network Toolbox. The network input parameters are a set of tuples, consisting of load values in each of the three phases of the power supply system, which are resistive-inductive in nature. There are six input quantities in total (load resistance and inductance values in each of the three phases) and all their values are different, which causes current asymmetry in the network and reactive power. The target matrix is formed from tuples, consisting of three values, which are the parameters of the symmetrical compensating device, calculated by the optimization method, in such a way as to compensate reactive power and to balance currents in the network. The number of data tuples, required to train a neural network was determined empirically. During the experiments, the optimal number of neurons in the neural network was also revealed. The use of the generated neural network to calculate the parameters of the symmetry-compensating device determined approximate solutions is comparable in accuracy to the values, found by optimization methods. With the help of the generated neural system, adequate quasi-solutions for calculating the parameters of the symmetry-compensating device were determined, which, in case of calculation, using the optimization method, led to anomalous values, that didn't optimize the energy coefficients of the power supply system to the required extent. Also, such neuropredictions protect the system from receiving excessive high parameters of symmetry compensating device, which can be obtained with an optimization approach.

Keywords: neural network, Bayesian regularization learning algorithm, input matrix, target matrix, set of tuples, search optimization methods, power supply system.

Introduction. Issues of improving the quality of electrical energy are key to the development of the Ukrainian economy and require the implementation of modern intellectual tools to improve energy performance. The unbalanced load of consumers in the phases of a three-phase power supply system leads to such phenomena, as an increase in current values in the network, their asymmetry and an increase in reactive power. High values of these indicators have a negative impact both on the equipment, used by consumers themselves, and on the power supply system as a whole. One way to solve this problem is to use special symmetry-compensating devices connected to a section of the power supply system, the parameters of which are calculated in such a way as to balance the currents in the power supply system and reduce reactive power to zero.

Optimization methods make it possible to calculate the parameters of symmetry-compensating devices with high accuracy [1, 2], however, this approach has a number of disadvantages. It takes quite a long time, since the number of iterations on average reaches 200–300. In addition, depending on the setting of the initial conditions, alternative cases may arise, when, using optimization methods, where the values of symmetry-compensating devices determined are by an order of magnitude greater than those, used in practice [3]. Situations arise, when calculations lead to anomalous values, that do not actually balance currents in the network and do not reduce reactive power.

The application of neural networks is a powerful tool for quickly determining the parameters of symmetry-compensating devices and monitoring their adequacy of the

© Yagup K. V., Yagup V. G., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Commons [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of



solution [4–10], so the issue of their use in the field of improving electrical energy coefficient is actual.

Purpose of the study. The purpose of the article is to study the possibility of using a neural network with Bayesian regularization learning algorithm to calculate the parameters of a symmetry-compensating device, that increases the energy coefficients of the power supply system.

Main part. The power supply system, considered in the study, consists of voltage sources, resistance of power line wires, characterized by active and inductive elements, designated accordingly in each phase $z_a, z_b, z_c, L_a, L_b, L_c$, load currents, consisting of active resistances R_a, R_b, R_c and inductances L_a, L_b, L_c . Compensation of reactive power, reduction of current values and their balancing in the network is carried out by a symmetry compensating device, which consists of three balancing capacitors, each of which is connected between two phases of the supply system, respectively C_{ab}, C_{bc}, C_{ac} . An uneven load in each phase of the power supply system creates current asymmetry (fig. 1) and contributes to an increase in reactive power in the power supply.

To balance currents in the network and minimize reactive power, it is necessary to calculate the corresponding values of compensating capacitors. Such values can be determined with high accuracy using the Nelder – Mead optimization method or the deformed polyhedron method. In this study, this method was used to compile a training set of experimental data for further training of the neural network.

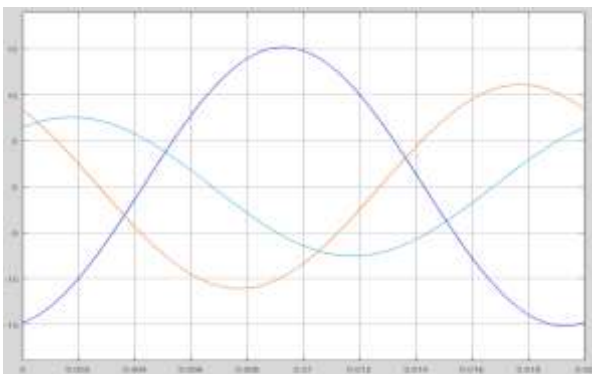


Fig. 1. Oscillograms of power network currents in asymmetric load mode

The research itself was carried out in MATLAB using the machine learning tool Neural Network Toolbox. To train the neural network, the Bayesian regularization algorithm was chosen, which is based on a probabilistic approach. This kind of approach to training a neural network has a number of advantages: it allows to carry out fairly accurate data predictions, does not require iterative training procedures, and is cost-effective from a computational point of view [11–13]. The architecture of the selected neural network is shown in fig. 2. During the experiments carried out, it was found, that the most acceptable network training occurs with a number of neurons equal to 28.

Initial training of the neural network was completed on data set, that consisted of 70 tuples. Here, the training data sets were compiled in such a way, that the load value

in one of the phases (for example, in phase C) significantly exceeded the load values in the other phases. To do this, the load in phase C gradually increased in the following ranges $R_c = [1–10] \text{ Om}$, $L_c = [0.005–0.08] \text{ H}$ in the tuples, and the parameter values in other phases changed within the following limits of their values – in phase A: $R_a = [0.09–0.1] \text{ Om}$, $L_a = [0.001–0.02] \text{ H}$; in phase B: $R_b = [0.9–3] \text{ Om}$, $L_b = [0.01–0.12] \text{ H}$. At the same time, two variants of the target matrix were considered for training the neural network. In the first version, the matrix consisted of both positive and negative values of the symmetry-compensating device (as it was determined directly during optimization); fig. 3, *a–c*.

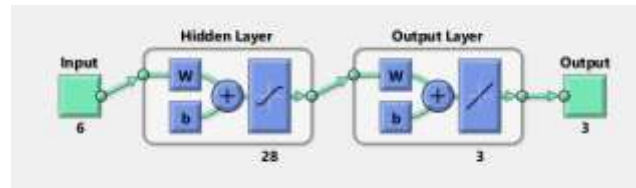


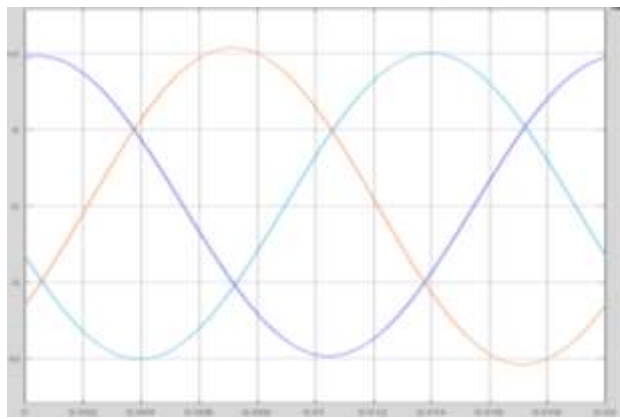
Fig. 2. Architecture of the selected neural network

In the second option, all negative values were replaced with positive equivalents (fig. 4, *a–c*), since in fact values that are substituted into the symmetry-compensating device, are previously converted to positive values and are multiplied by 10^{-6} . Using a neural network, in which only positive values are specified in the target matrix gives a more accurate result (fig. 3, *a*) than a neural network in which the target matrix was used with both positive and negative values (fig. 4, *a*). Therefore, in future researches, a target matrix is used, which consists only of positive values.

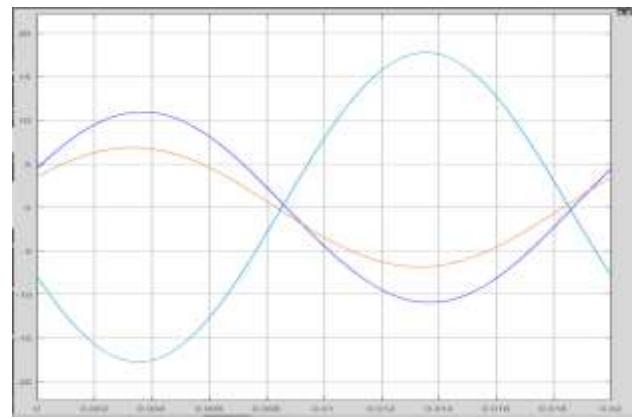
The calculation results showed, that the data used, in which the load value in phase C exceeds the load values in the other phases, made it possible to train a neural network that determines the parameters of the control system with sufficient accuracy, setting the load in the phases within the appropriate limits. However, for example, when the load in phase B sufficiently increased, the neural network calculated values that do not balance the load currents in the network and do not compensate reactive power (fig. 5, fig. 6). So, we have to expand the data set.

To improve the accuracy of the calculations, the dataset for training the neural network was increased three times by adding new data sets of tuples. First additional data set was generated by swapping position of the parameters of phases of power supply system A with B, that are parameters of the input matrix and in the target matrix. Second additional data set has been received by swapping tuples position of the input matrix and of the target matrix of phases A with C. Such a way we reached an opportunity to expand the training capabilities of a neural network. Thus, the trained neural network made ability to conduct a number of experiments that made it possible to find adequate values for the parameters of symmetry-compensating devices (fig.7).

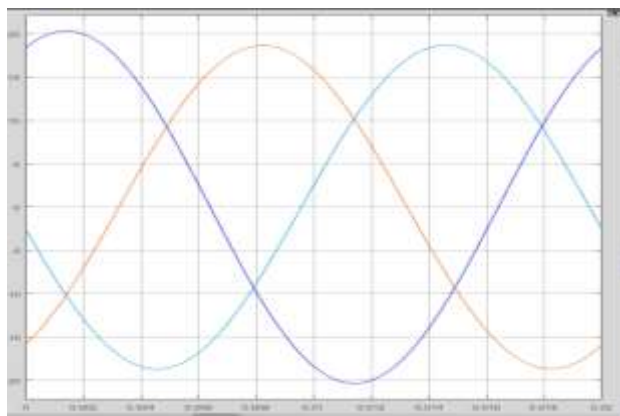
However, in some cases, current balancing may not be performed to the required extent (fig. 8). In such a case, the neural network was retrained, which led to a positive result (fig. 9).



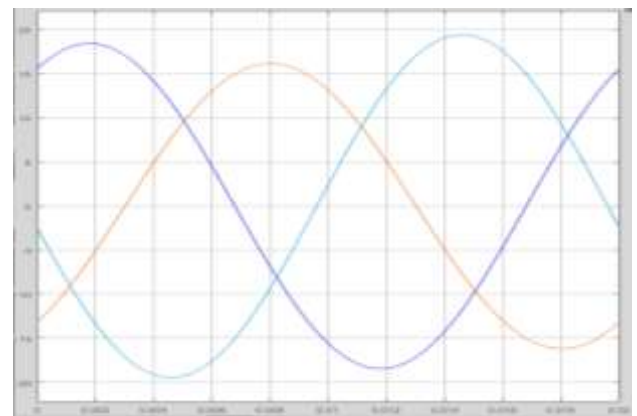
a



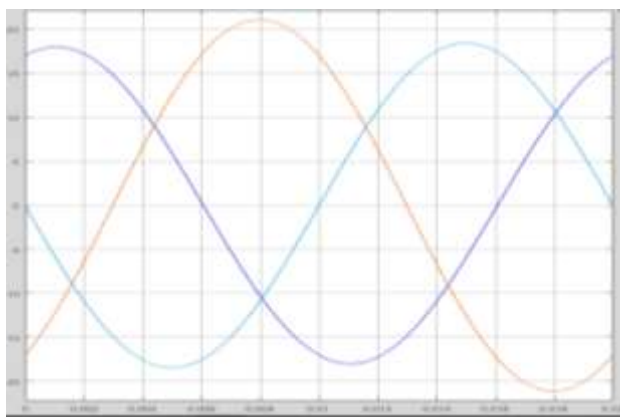
a



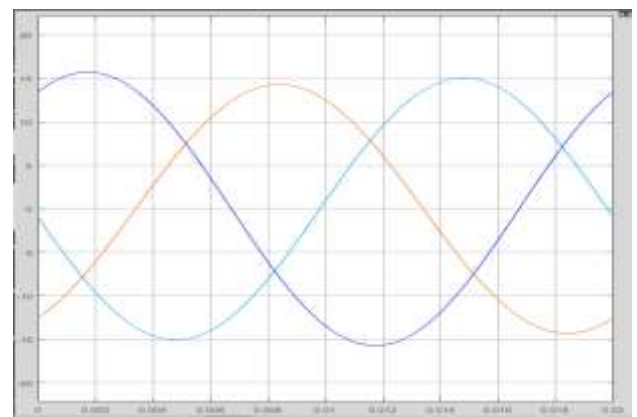
b



b



c



c

Fig. 3. Oscillogram of currents in supply line with parameters of SCD calculated by a neural network with a target matrix having only positive values: *a* – with parameters $R_a = 0.1$, $L_a = 0.003$, $R_b = 1.2$, $L_b = 0.1$, $R_c = 2.5$, $L_c = 0.04$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 220.6514$, $C_{bc} = 90.8858$, $C_{ac} = 316.5833$; *b* – with parameters $R_a = 0.7$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2.5$, $L_c = 0.08$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 759.2736$, $C_{bc} = 317.1794$, $C_{ac} = 152.9549$; *c* – with parameters $R_a = 0.6$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2$, $L_c = 0.08$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 711.8675$, $C_{bc} = -281.2767$, $C_{ac} = 116.2679$

Fig. 4 Oscillogram of currents in supply line with parameters of SCD calculated by a neural network with a target matrix specified by positive and negative values: *a* - with parameters $R_a = 0.1$, $L_a = 0.003$, $R_b = 1.2$, $L_b = 0.1$, $R_c = 2.5$, $L_c = 0.04$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 17.1714$, $C_{bc} = -148.2129$, $C_{ac} = 413.4182$; *b* - with parameters $R_a = 0.7$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2.5$, $L_c = 0.08$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 707.7111$, $C_{bc} = -331.1599$, $C_{ac} = 150.9918$; *c* - with parameters $R_a = 0.6$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2$, $L_c = 0.08$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 711.8675$, $C_{bc} = -281.2767$, $C_{ac} = 116.2679$

Using the developed neural network, the parameters of the control system were determined in operating modes in which anomalous values were obtained during search

optimization that did not balance the currents in the network. These data are shown in table 1.

To reduce the number of iterations when using optimization methods, non-zero initial conditions are set. However, with this approach, the resulting solution can be

characterized by fairly large values of energy coefficients. For example, with the parameters of the supply network $R_a = 0.7$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2$, $L_c = 0.04$

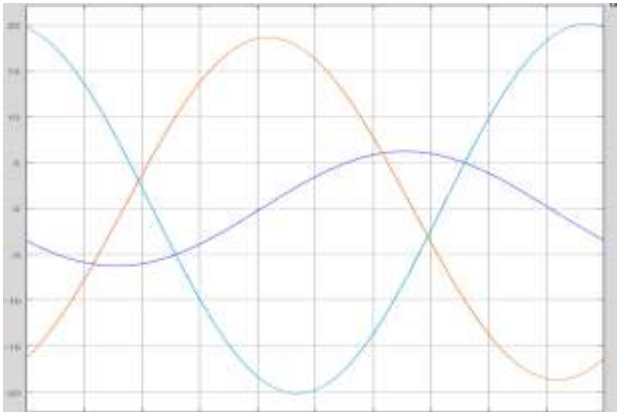


Fig 5. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 1$, $L_a = 0.01$, $R_b = 2$, $L_b = 0.04$, $R_c = 0.3$, $L_c = 0.003$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = -346.0767$, $C_{bc} = -205.0130$, $C_{ac} = 393.6867$ calculated by a neural network trained on 70 sets of tuples



Fig. 8. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 2$, $L_a = 0.04$, $R_b = 0.3$, $L_b = 0.003$, $R_c = 1$, $L_c = 0.01$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 46.1874$, $C_{bc} = 631.5026$, $C_{ac} = 26.9037$ calculated by a neural network trained on 210 sets of tuples

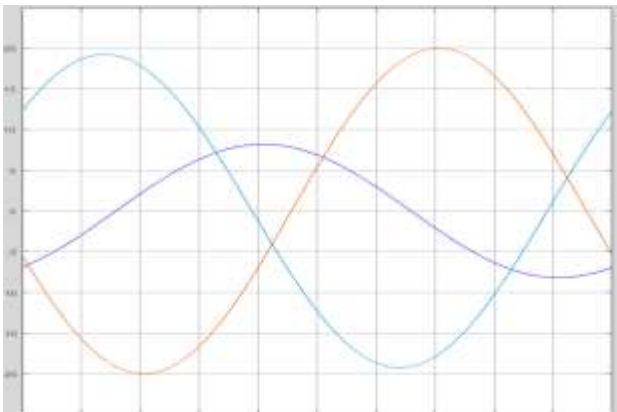


Fig. 6. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 2$, $L_a = 0.04$, $R_b = 0.3$, $L_b = 0.003$, $R_c = 1$, $L_c = 0.01$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 45.8234$, $C_{bc} = 382.2415$, $C_{ac} = -26.90376$, calculated by a neural network trained on 70 sets of tuples

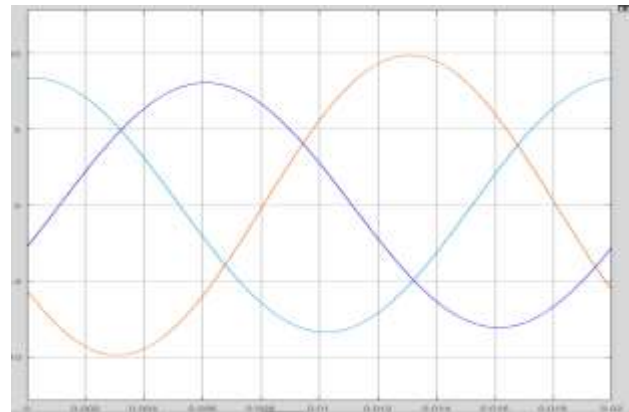


Fig. 9. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 2$, $L_a = 0.04$, $R_b = 0.3$, $L_b = 0.003$, $R_c = 1$, $L_c = 0.01$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 35.7603$, $C_{bc} = 613.3234$, $C_{ac} = 128.8183$ calculated by a neural network trained on 210 sets of tuples after retraining

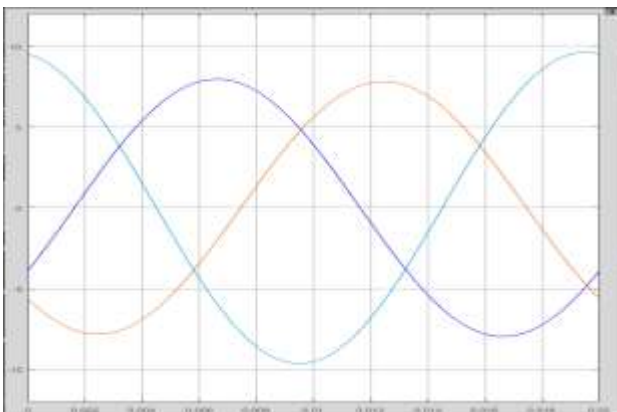


Fig. 7. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 1$, $L_a = 0.01$, $R_b = 2$, $L_b = 0.04$, $R_c = 0.3$, $L_c = 0.003$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 137.8644$, $C_{bc} = 45.4429$, $C_{ac} = 621.1652$ calculated by a neural network trained on 210 sets of tuples

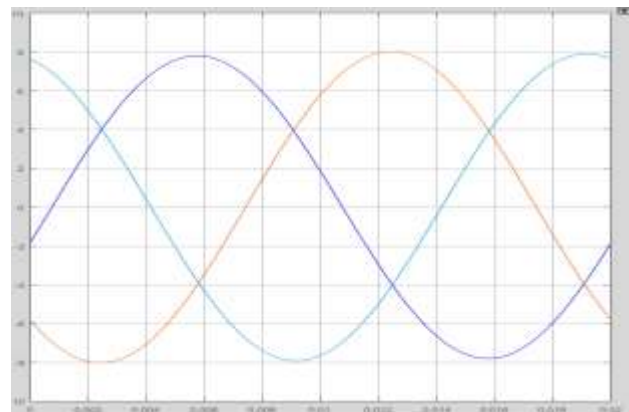


Fig. 10. Oscillograms of currents of network with parameters $R_a = 0.7$, $L_a = 0.005$, $R_b = 1$, $L_b = 0.01$, $R_c = 2$, $L_c = 0.04$ and capacities of compensating capacitors $C_{ab} = 543.8627$, $C_{bc} = 159.7113$, $C_{ac} = 12.7429$

Table 1 – Parameters of symmetry-compensating device with anomalous values

Electrical network parameters Ra, La, Rb, Lb, Rc, Lc	Anomalous values received by optimization Cab, Cbc, Cac	Capacitor values calculated using a neural network Cab, Cbc, Cac
0.3; 0.0061; 1; 0.04; 1.9; 0.06	135.4102; -0.0000; -0.4816	194.4882; 11.6204; 109.8851
0.3; 0.0061; 1; 0.04; 1.91; 0.06	135.4781; 0.0000; -0.4822	194.5336; 11.6506; 109.9143
0.3; 0.0061; 1; 0.04; 2.5; 0.06	139.3876; -0.0000; -0.4576	200.2118; 7.5557; 105.3951
0.3; 0.006; 1; 0.04; 2; 0.06	135.9989; 0.0000; 0.8182	196.3479; 11.9890; 110.6901
0.3; 0.001; 1; 0.04; 2; 0.06	176.9020; -0.0001; -0.5585	270.6922; 25.1454; 156.7750

and the initial conditions $C_{ab} = C_{bc} = C_{ac} = 4000$, the capacitance values of the compensating capacitors reached high values $C_{ab} = 3935.3$, $C_{bc} = 3555.5$, $C_{ac} = 3407.7$. Such values actually compensate reactive power and balance currents in the phases, however, the values of network currents reach more than 800 A, which is extremely dangerous for the wires of the power supply system and unacceptable for use. When calculating the parameters of a symmetry-compensating device using the generated neural network, the values $C_{ab} = 543.8627$, $C_{bc} = 159.7113$, $C_{ac} = 12.7429$ were obtained. They balance the currents and reduce their values sufficiently (fig. 10), and can be used in practice. It should also be noted, that the results obtained are quite close to the exact values obtained from calculations using the optimization method with initial conditions $C_{ab} = C_{bc} = C_{ac} = 0$, where final result is $C_{ab} = 562.2$, $C_{bc} = 182.3$, $C_{ac} = 34.4$.

Conclusions

1. During the experiments, the parameters of the neural network and the number of training data sets were determined, which calculate the parameters of the symmetry-compensating device that optimizes the operation of the power supply system. This significantly reduces the time required for balancing network currents and reactive power compensation in the power supply system.

2. The generated neural network, trained using Bayesian regularization algorithm, makes it possible to determine adequate parameters for symmetry-compensating device, which, when calculated using optimization methods, did not increase the energy coefficients in the power supply system and were not anomalous parameters,

3. When receiving data that does not sufficiently improve the energy coefficients of the power supply system, it is possible to correct the symmetry-compensating device data sets by retraining the neural network using the Bayesian regularization algorithm.

References

1. Ягуп Е. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности с использованием модели и поисковой оптимизации. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. № 150. С. 115–120.
2. Ягуп Е. В. Моделирование несимметричной системы электроснабжения с использованием оптимизации для определения параметров симметрирующего устройства. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. №161. С. 130–138.
3. Ягуп Е. В., Ягуп В. Г. Исследование режимов полной компенсации реактивной мощности в трехфазной системе электроснабжения. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. №2. С. 61–65.

4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (access date: 01.11.2023).
5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. URL: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (access date: 01.11.2023).
6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. URL: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (access date: 01.11.2023).
7. Хайкин С. *Нейронные сети. Полный курс*. Москва: Вильямс, 2006. 1104 с.
8. Haykin S. *Neural networks. A comprehensive foundations*. McMillan College Publ.Co. N.Y., 1994. 696 p.
9. Люгер Ф. *Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем*. Москва: Вильямс, 2003. 864 с.
10. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. Vol. 39. P. 381–384.
11. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017. Vol. 18, no. 1. P. 1558–1590.
12. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009. Vol. 21 (3). P. 786–792.

References (transliterated)

1. Yagup E. V. Raschet parametrov ustroystva kompensatsii reaktivnoy moshnosti s ispolzovaniem modeli i poiskovoy optimizatsii [Calculation of parameters of a reactive power compensation device using a model and search optimization]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport]. 2014, no. 150, pp. 115–120.
2. Yagup E. V. Modelirovanie nesimmetrichnoy sistemyi elektrosnabzheniya s ispolzovaniem optimizatsii dlya opredeleniya parametrov simmetriuyushchego ustroystva [Modeling of an unbalanced power supply system using optimization to determine the parameters of a balun]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport]. 2016, no. 161, pp. 130–138.
3. Yagup E. V., Yagup V. G. Issledovanie rezhimov polnoy kompensatsii reaktivnoy moshnosti v trekhfaznoy sisteme elektrosnabzheniya. [Research of full reactive power compensation modes in a three-phase power supply system]. *Elektrotekhніка i elektromekhanika* [Electrical engineering and electromechanics]. 2019, no. 2, pp. 61–65.
4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (access date: 01.11.2023).
5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. URL: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (access date: 01.11.2023).
6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. URL: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (access date: 01.11.2023).
7. Haykin S. *Neuronnyye seti. Polnyi kurs*. [Neural networks. A comprehensive foundations]. Moscow, Vilyams Publ., 2006. 1104 p.
8. Haykin S. *Neural networks. A comprehensive foundations*. McMillan College Publ.Co. N.Y. 1994. 696 p.
9. Lyuger F. *Iskusstvennyiye intelekt: strategii i metodyi resheniya slozhnykh problem* [Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Complex Problems]. Moscow: Vilyams Publ., 2003. 864 p.

10. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008, vol. 39, pp. 381–384.
11. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017, vol. 18, no. 1, pp. 1558–1590.
12. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009, vol 21 (3), pp. 786–792.

Received 13.11.2023

УДК 004.89

К. В. ЯГУП, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальні технології управління; Харків, Україна; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>

В. Г. ЯГУП, доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; e mail: yagup.walery@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

ЗАСТОСУВАННЯ БАЙЄСІВСЬКОЇ РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Досліджується можливість використання нейронних мереж у сфері підвищення енергетичних показників системи електропостачання з нерівномірним навантаженням у фазах. Така необхідність обґрунтована тим, що розрахунок необхідних параметрів симетро-компенсувального пристрою раніше ґрунтувався на методі пошукової оптимізації Нелдера – Міда. Виконання пошукової оптимізації вимагає значних обчислювальних витрат, займає тривалий час обчислення і може розраховувати аномальні значення. У статті розвивається ідея використання технології прогнозування параметрів симетро-компенсувального пристрою на основі нейромережевого моделювання із застосуванням байєсівської регуляризації. Для заданого набору вихідних даних найкращою підбраною конфігурацією виявилася нейронна мережа двох шарів реалізована в пакеті MATLAB засобами інструменту машинного навчання Neural Network Toolbox. Вхідні параметри мережі являють собою набір кортежів, що складаються з величин навантажень у кожній із трьох фаз системи електропостачання, що мають резистивно-індуктивний характер. Усього вхідних величин шість (значення опору та індуктивності навантаження в кожній із трьох фаз) і всі їх значення відрізняються, що і створює несиметрію струмів у мережі та реактивну потужність. Матриця цілей сформована з кортежів, що складаються з трьох величин, що є розраховані методом оптимізації параметри симетро-компенсувального пристрою, таким чином, щоб компенсувати реактивну потужність і відсиметрувати струми в мережі. Досвідченим шляхом визначено кількість кортежів даних, необхідні навчання нейронної мережі. Під час проведення експериментів також виявлено оптимальну кількість нейронів нейронної мережі. Застосування сформованої нейромережі для розрахунку параметрів симетро-компенсувального пристрою визначило наближені рішення, які можна порівняти за точністю зі значеннями, знайденими оптимізаційними методами. За допомогою сформованої нейронної системи визначено адекватні квазірішення розрахунку параметрів симетро-компенсувального пристрою, які при розрахунках оптимізаційним методом призводили до аномальних значень, які не виконували оптимізацію енергетичних показників системи електропостачання у необхідній мірі. Також такі нейропередбачення захищають систему від отримання надмірно завищених параметрів симетро-компенсувального пристрою, які можуть бути отримані при оптимізаційному підході та аномальних значень.

Ключові слова: нейронна мережа, навчання за алгоритмом Байєсівської регуляризації, вхідна матриця, матриця цілей, набір кортежів, методи пошукової оптимізації, система живлення.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Ягуп Катерина Валеріївна, Yagup Kateryna Valeriivna

Автор 2 / Author 2: Ягуп Валерій Григорович, Yagup Valery Grygorovych

УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.04

УДК 004.9: 658.8

В. В. МОСКАЛЕНКО, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інформаційних систем та технологій; м. Харків, Україна, e-mail: valentinamosk17@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9994-5404>

А. О. МАТВІЄНКО, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри інформаційних систем та технологій; м. Харків, Україна, e-mail: andrii.matvienko@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6346-8510>

Н. Г. ФОНТА, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна, e-mail: natalia.fonta@dataart.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5593-1409>;

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ MARKETING CLOUD SALESFORCE CRM В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ КОМПАНІЇ

Метою дослідження є підвищення рівня ефективного залучення нових клієнтів та утримання існуючої клієнтської бази компанії через реалізацію інноваційних маркетингових стратегій. Доведено доцільність використання концепції управління взаємовідносинами з клієнтами (Customer Relationship Management) та використання інформаційних систем класу CRM для досягнення мети. Досліджено CRM платформу Salesforce Marketing Cloud, яка відноситься до хмарних типів інформаційних систем. Наведено опис бізнес-логіки Salesforce Marketing Cloud, яка включає прийняття рішень на основі аналітичних даних, сегментацію клієнтів, автоматизацію індивідуального підходу до клієнтів з метою підвищення лояльності клієнтів і зростання доходу компанії. Salesforce Marketing Cloud надає можливість створювати персоналізовані маркетингові заходи та керувати ними, взаємодіяти з клієнтами за різними каналами, аналізувати наслідки маркетингових зусиль для постійного вдосконалення маркетингових стратегій компанії. Досліджено функціональність та особливості основних компонентів Salesforce Marketing Cloud. У Salesforce Marketing Cloud реалізовано такі основні функції: email-маркетинг, мобільний маркетинг, управління соціальними медіа-заходами та іншими видами маркетингу. Користувачі Salesforce Marketing Cloud можуть створювати персоналізовані маркетингові заходи та управляти ними, за кількома каналами взаємодіяти з клієнтами та аналізувати маркетингові зусилля для постійного вдосконалення маркетингових стратегій. Здійнено роботу проектування архітектури Salesforce Marketing Cloud для поведінкової сегментації клієнтів компанії. Розроблено Web-додаток для покращення роботи користувачів платформи з даними клієнтів, що зберігаються в Data Extensions. Для автоматизації сегментації клієнтів на основі їх поведінкових даних була використана Automation Studio, побудовані SQL запити, використані системні таблиці даних Data Views. Розроблена архітектура Marketing Cloud Salesforce CRM на основі поведінкової сегментації є важливим інструментом для реалізації маркетингової стратегії компанії, забезпечуючи успішне залучення та утримання клієнтів, а також для досягнення стратегічних цілей.

Ключові слова: customer relationship management, поведінкова сегментація, salesforce marketing cloud, архітектура, база даних, data extension, automation studio, visual studio code.

Вступ. Сучасна маркетингова діяльність компанії – це комплекс інформаційних, технічних і програмних засобів, баз даних, сховищ даних, методів комунікації, а також наявність фахівців, які здійснюють роботу з даними, аналіз інформації з метою підготувати ефективні маркетингові рішення. В умовах високого рівня конкуренції як на глобальному, так і на локальних ринках компанії потрібні ефективні маркетингові стратегії. Для реалізації маркетингових стратегій компанії необхідно використовувати спеціальні інформаційні системи для накопичення та аналізу ринкових даних. Особливої уваги потребує розробка стратегії залучення нових та утримання старих клієнтів компанії. Згідно аналітики Harvard Business Review підвищення рівня

утримання клієнтів лише на 5 % може збільшити прибуток компанії до 95 %. Тому компанії для свого виживання впроваджують в систему управління концепцію управління взаємовідносинами з клієнтами (Customer Relationship Management – CRM). Однією із стратегій активізації довгострокових контактів з існуючими та потенційними клієнтами є стратегія використання CRM. Компанія концентрує свої зусилля на утримання своїх клієнтів завдяки якісного їх обслуговування. Для цього потрібно на основі зібраної інформації формувати маркетингову стратегію, яка стосується виробництва товарів з відповідними якісними характеристиками, просування цих товарів на ринок, організація ефективних каналів їх продажу та

© Москаленко В. В., Матвієнко А. О., Фонта Н. Г., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



обслуговування клієнтів. Бізнес-процеси, які вбудовані в маркетингову стратегію компанії, вимагають належного планування та потужних інструментів для їх успішної реалізації. Тому концепція управління взаємовідносинами з клієнтами втілена у відповідну інформаційну систему – CRM систему. CRM системи представляють собою програмне забезпечення, яке об'єднує в одну базу даних усю маркетингову інформацію, у тому числі дані щодо продажів та даних з обслуговування клієнтів.

У роботі досліджується CRM платформа Salesforce Marketing Cloud (SFMC), яка відноситься до хмарних типів систем. Хмарна CRM надає повний спектр функцій управління взаємовідносинами з клієнтами, а саме: доступ до ринкової аналітики, даних про клієнтів та інформації бізнес-аналізу, автоматизація критичних бізнес-функцій, наприклад, щоб допомогти утримувати клієнтів надаються інструменти підтримки або обслуговування клієнтів, механізми закриття продажів тощо [1]. Серед популярних хмарних CRM, окрім платформи SFMC, є такі системи: Agile CRM, HubSpot CRM, SugarCRM і Zoho CRM. Salesforce Sales Cloud – це ефективна платформа як програмне забезпечення (Software as a Service – SaaS) з доступом через будь-який браузер [2].

Постановка задачі дослідження. Мета дослідження – це підвищення рівня ефективного залучення нових клієнтів та утримання існуючої клієнтської бази компанії через реалізацію інноваційних маркетингових стратегій, використовуючи CRM SFMC.

Об'єкт дослідження – процес залучення нових та утримання наявних клієнтів компанії, формування маркетингових стратегій для визначених сегментів клієнтів компанії.

Важливим елементом маркетингової діяльності є визначення сегментів ринку та розробка маркетингових стратегій компанії для цих сегментів. Сегментація клієнтів компанії – це процес поділу великої та різноманітної кількості клієнтів на менші та більш однорідні сегменти на основі спільних їх характеристик або їх потреб. Мета сегментації ринку – це створення більш персоналізованих і релевантних маркетингових заходів, які треба проводити на кожному сегменті для спонукання покупців (клієнтів) до певних дій, наприклад, відвідувати магазини та покупати товари.

Сегментація клієнтів (покупців існуючих та потенційних) важлива, оскільки вона націлена на:

- визначення цільової аудиторії клієнтів та розуміння їхніх потреб, уподобань, больових точок та мотивації;
- створення ефективної пропозиції відповідно до інтересів і очікувань кожного сегмента;
- задоволення конкретної потреби, яка допоможе підвищити рівень конверсії;
- побудування стосунків зі своїми клієнтами та завоювання їх лояльності;
- оптимізація маркетингового бюджету і ресурсів компанії через зосередження на найбільш прибуткових сегментах;
- залучення потенційних клієнтів для прискорення циклу продажів товарів компанії;

- уникнення пастки створення загального та посереднього контенту, який потім не буде подобатися нікому;

- спілкування зі своїми клієнтами на своєму рівні та забезпечення цінності, яка їм важлива.

Сформована задача дослідження: здійснити сегментування клієнтів за допомогою спроектованої структури Salesforce Marketing Cloud.

Опис бізнес-логіки Salesforce Marketing Cloud. Платформа CRM SFMC побудована з окремих модулів, як поділені на два класи: «Studio» та «Builder».

Бізнес-логіка Marketing Cloud реалізується через реалізацію її ключових функцій. Розглянемо ці функції.

Управління даними клієнтів. Відстежуючи історію покупок, взаємодії та інші ключові показники, можна отримати цінну інформацію про те, що мотивує клієнтів і чого вони хочуть від товару або послуги [3].

Сегментація. Дотримуючись стратегії сегментації клієнтів, розподіляються клієнти на класи зі схожими атрибутами. Потім формуються маркетингові плани для таких класів (сегментів) [4].

Маркетинг електронною поштою. Це ефективний спосіб розвитку бізнесу. За даними OptinMonster, 99 % населення перевіряють свою електронну пошту принаймні раз на день, це надійний спосіб охопити цільову аудиторію [5]. Також, за даними Litmus, компанії можуть заробляти 36 \$ США за 1\$, який витрачається на маркетинг через електронну пошту.

Маркетинг у соціальних мережах. Компанії залежать від Інтернет-маркетингу [6]. Персональний підхід до «соціальних» медіа бренду компанії робить цифрові маркетингові зусилля легшими. Відповідно до звіту, опублікованого Gartner, 64 % респондентів сказали, що коли справа доходить до продажу, то клієнтський досвід є важливішим фактором, ніж ціна. За результатами опитування Timken Group, 77 % клієнтів рекомендують друзям компанію після позитивного досвіду покупок товарів компанії тощо [7].

Аналітика та звітність. Ефективна звітність і аналітика надає керівництву цінну інформацію, яка допоможе приймати успішні бізнес-рішення [8]. Це надає можливість відстежувати ключові показники ефективності (KPI) і приймати рішення на основі аналітичних даних.

Мобільний маркетинг [9]. Як доводить статистика, середній коефіцієнт конверсії реклами у смартфонах досягає 64 % у порівнянні із середнім коефіцієнтом конверсії для комп'ютерів.

Відповідальність і безпека. Невід'ємною вимогою існування компанії та спільної праці з клієнтами є відповідність юридичним стандартам, нормативним вимогам, найкращим галузевим практикам і договірним зобов'язанням, а також забезпечення безпеки даних клієнтів [10]. Вимоги безпеки даних відображені у міжнародних документах, наприклад: у європейському загальному законі щодо захисту даних (GDPR); у законах Сарбейнса – Окслі (SOX) та Гремма – Ліча – Блайлі; у закону щодо перенесення та підзвітності медичного страхування (HIPAA); у стандарті безпеки даних платіжних карток (PCI-DSS). Marketing Cloud

надає різноманітні функції та інструменти, які допоможуть виконати вимоги GDPR і захистити особисті дані клієнтів.

Отже, Salesforce Marketing Cloud надає можливість створювати персоналізовані маркетингові заходи та керувати ними, взаємодіяти з клієнтами за різними каналами, аналізувати наслідки маркетингових зусиль для постійного вдосконалення маркетингових стратегій.

Результати дослідження структурних елементів SFMC. У результаті проектування необхідної структури платформи Salesforce Marketing Cloud здійснюється налаштування окремих її модулів, а також організація взаємозв'язків між її модулями.

Розглянемо більш детально модулі системи. Ці модулі дозволяють користувачу автоматизувати бізнес-процеси компанії для реалізації маркетингових стратегій (рис.1).

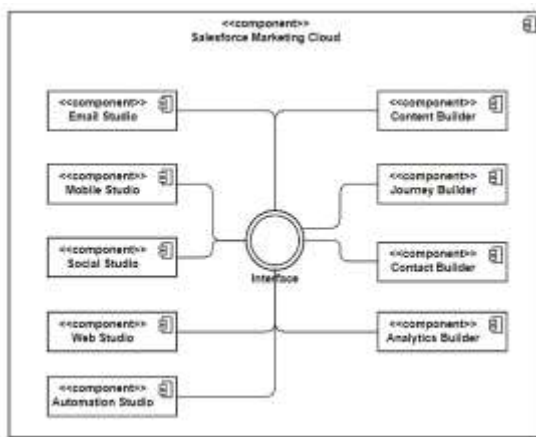


Рис. 1. Діаграма компонентів системи

«Email Studio» – це модуль для створення, управління та здійснення email-кампаній [11]. Тут реалізовані різні інструменти для побудови цифрового маркетингу.

«Mobile Studio» – це модуль, який дозволяє здійснити мобільний маркетинг та спеціалізується на взаємодії з клієнтами через мобільні пристрої, такі як смартфони та планшети. Тут є інструменти для створення та виконання мобільних маркетингових заходів та взаємодії зі споживачами.

«Social Studio» – це модуль, який спеціалізований на соціальному медіа-маркетингу та взаємодії з аудиторією через соціальні мережі. Він дозволяє фахівцям у сфері маркетингу ефективно управляти своєю присутністю у різних соціальних мережах, створювати та виконувати соціальні медіа-заходи, відстежувати відгуки споживачів.

«Web Studio» – це модуль, який дозволяє маркетологу збирати дані клієнтів і створювати персоналізований контент для цільових сторінок, мобільних додатків тощо. Тут можна створювати весь вебконтент і управляти їм, а також публікувати його на Інтернет ресурсах чи розміщувати у мобільних додатках. «Web Studio» має модуль «Cloud Pages», який надає можливість створювати та розгортати вебсторінки або лендінги безпосередньо в межах плат-

форми SFMC. Цей модуль створений для зручної розробки і публікації вебсторінок для заходів, опитувань та іншого вебконтенту, який використовується для взаємодії з аудиторією [12].

«Automation Studio» – це модуль, який призначений для автоматизації маркетингових процесів і завдань компанії. Він надає фахівцям з маркетингу такі інструменти: створення автоматизованих заходів та управління ними; здійснення розсилки повідомлень та інших завдань маркетингової автоматизації.

«Content Builder» – це міжканальний інструмент керування вмістом, який дозволяє об'єднувати зображення, документи та вміст в одному місці для використання в Marketing Cloud. «Content Builder» має кілька функцій аналізу та оптимізації електронних заходів через Marketing Cloud. За статистикою щодо використання електронного маркетингу 47% респондентів стверджують, що інструменти електронного маркетингу є ефективними для підвищення лояльності та утримання клієнтів.

Сучасний маркетолог може за допомогою «Content Builder» реалізувати такі функції:

- створення електронних листів з блоками вмісту;
- створення адаптивного дизайну електронної пошти, використовуючи вбудовані шаблони, макети та блоки вмісту;
- збільшення залученості та рейтингу кліків (CTR) за допомогою інтерактивного вмісту (наприклад, форма електронної пошти та карусельзображень);
- доставка релевантного персоналізованого вмісту, використовуючи персоналізацію 1-на-1.

Існують такі варіанти підвищення персоналізації у системі Marketing Cloud:

- динамічний вміст – цільовий вміст для кожного сегмента клієнтів;
- рядки персоналізації – дані передплатника або системні дані у темі, попередній заголовок і тіло електронного листа тощо;
- AMPscript – мова сценаріїв для використання розширених сценаріїв динамічного вмісту;
- автоматизація рутинних процесів розсилок електронною поштою за допомогою Content Builder Approvals.

«Journey Builder» – це інструмент для планування, який дає змогу розробляти та автоматизувати заходи, які спрямовують клієнтів на їхній шлях до компанії та її товарів (рис. 2). Він дозволяє реалізувати короткострокову взаємодію з клієнтом, наприклад, провести розсилку-привітання нових клієнтів, вітання з днем народження тощо, також здійснити й довготривалі заходи, наприклад, впровадити програму накопичення бонусів для постійних клієнтів.

«Contact Builder» – модуль, який допомагає компанії краще розуміти та управляти контактною інформацією та клієнтською базою. За допомогою цього модуля можна створювати та управляти однорідними профілями контактів клієнтів з різних джерел даних для забезпечення персоналізованої та ефективної комунікації з клієнтами.



Рис. 2. Робочий простір Journey Builder платформи SFMC

«Analytics Builder» дозволяє отримати дані про поведінку та інтереси контактів компанії у різних каналах комунікації. Ця статистика може бути використана для розробки маркетингових цілей та вдосконалення шляхів взаємодії компанії з клієнтами. За допомогою «Analytics Builder» можна: вимірювати залученість і ефективність маркетингових заходів через електронну пошту; здійснити налаштування відображення інформаційної панелі для візуалізації даних у діаграмах і графіках та гнучких таблицях; використовувати можливості компоненти «Collect» для перегляду поведінки контактів (клієнтів), наприклад, їх кліки та покупки; для створення цільової аудиторії на основі прогнозних моделей поведінки клієнта; для відстеження взаємодії під час роботи «Journey» та вимірювання прогресу у досягненні мети тощо.

Правильне проектування структури елементів Salesforce Marketing Cloud створює основу для формування та реалізації ефективної маркетингової стратегії. Це дозволяє ефективно використовувати можливості платформи, персоналізувати комунікацію з клієнтами та адаптуватися до змін у бізнес-середовищі. На рис. 3 наведено приклад взаємодії компонентів платформи з клієнтом.

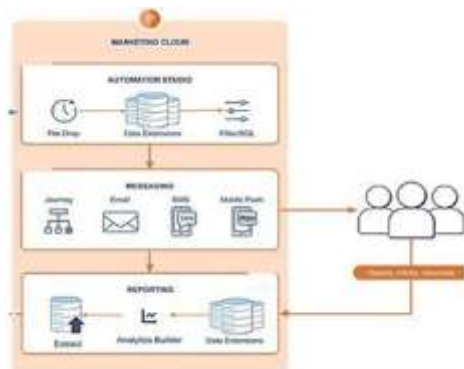


Рис. 3. Приклад взаємодії компонентів платформи з клієнтом

Проектування архітектури Salesforce Marketing Cloud для сегментації клієнтів компанії. Розглянемо три потужні інструменти сегментації даних SFMC, які будемо використовувати для розв'язання поставленої задачі.

«Data filters» є найпростішим способом сегментації клієнтів. Створюється фільтр за одним або за декількома полями таблиці. Для кожного стовпця поля обирається оператор і значення. Використовується оператор «I» або «АБО», щоб додати умови фільтрування.

«SQL Queries» – це основний спосіб сегментації клієнтів з використанням SQL. Щоб отримати доступ до SQL, необхідно перейти до модуля «Journey Builder» у вікні «Automation Studio». У списку «Activities» обрати «Create Activity» та вибрати «SQL Query». Можна автоматизувати виконання запитів SQL за допомогою «Automation Studio».

«Audience Builder» – це інструмент сегментації даних клієнтів за допомогою функціоналу «drag and drop» з різними можливостями. Тут можна фільтрувати розширення даних і додавати дані клієнтів (тобто створювати сегменти). Він має простий у використанні візуальний інтерфейс для створення простих або напівскладних сегментів. Завдяки можливостям інтелектуального підрахунку балів «Einstein AI» можна робити прогнози, що будуть робити клієнти у майбутньому.

Окрім цих інструментів сегментації даних у SFMC, можна використовувати різні додатки, підключаючи їх до SFMC.

Найпотужніший метод, який використовують маркетологи, щоб розуміти поведінку своїх клієнтів та уточнювати маркетинговий план і реагувати на потреби клієнтів для покращення взаємодії клієнтів з компанією є поведінкова сегментація клієнтів. У SFMC вся поведінкова інформація зберігається у керованих таблицях «Data Views», які зберігають взаємодії між клієнтами та вміст, який вони отримують через SFMC останні 6 місяців.

«Data Views» є інструментом для створення таблиць подій (наприклад, розсилка електронних листів та SMS, перегляд інформації про поведінку клієнтів – відкриття електронних листів, пересилання електронних листів, статус підписників тощо).

Ці дані зберігаються в таблицях метаданих «Data Extensions». Оскільки дані приховані в Marketing Cloud, то їх можна використовувати лише за допомогою пошуку SQL або Ampscript. Отже, поведінкові таблиці не доступні через UI платформи.

Кожна компанія, використовуючи SFMC, формує сегменти своїх клієнтів базуючись на даних, які вони мають на теперішній час. У даній роботі було створені з самого початку поведінкові таблиці клієнтів, які розділили клієнтів на більш і менш перспективних.

Вибірка даних автоматизована з використанням модуля «Automation Studio». Треба відзначити, що будь-яка компанія з самого початку роботи з SFMC може використовувати ці налаштування.

При проектуванні структури платформи SFMC враховано, що обрана маркетингова стратегія згідно поведінкової сегментації. Були використані такі структурні елементи (рис.4): «Email Studio»; «Automation Studio»; «Content Builder»; «Web Studio»; «Contact Builder»; «Journey Builder». Розглянемо детально роботу кожного з цих елементів.

Елемент «Email Studio» був використаний для організації бази даних клієнтів. Побудовані варіанти створення чотирьох таблиць даних формату «Data Extensions». Для сегментації клієнтів на основі їх поведінки та взаємодії з компанією було сформовано три таблиці. Збірка аналітичних даних email-розсилки була відображена у четвертій таблиці. Можливості «Automation Studio» були використані для автоматизації

процесу сегментації клієнтів на основі їх поведінкових даних. Були побудовані SQL запити, використовуючи системні таблиці даних «Data Views». Перша група активних клієнтів створена на основі даних щодо їх поведінки. Тут здійснено нарахування балів за відкриття листів та переходу за посиланнями, (рис. 5). Це дає в подальшому можливість фільтрувати даний сегмент, створюючи менші групи. Друга група формулася з потенційних клієнтів, які отримали електронну розсилку, але впродовж 7 днів ніяк не проявили себе, тобто не було реакції на отриману інформацію (рис. 6). Третя група – неактивні клієнти (рис. 7). Оскільки базу даних потрібно періодично чистити, тому формування такого сегменту потрібне для видалення «непрацюючих» даних у базі компанії. Також, щоб не отримувати блокування за спам розсилки неактивним клієнтам, їх дані треба видаляти. Для того, щоб мати агреговану інформацію щодо взаємодії компанії зі своїми клієнтами, була створена четверта таблиця даних. Ця таблиця – це фокус на статус визначеної маркетингової активності, наприклад, скільки успішних або відхилених розсилок було за останній місяць (рис. 8).

Отже, представлені дані чотирьох таблиць можуть бути використані для побудови маркетингових заходів компанії. Також, використовуючи їх з іншими даними можна проводити аналіз ефективності маркетингових заходів та розробляти маркетингової стратегії для кожного сегменту клієнтів.

Результати роботи SQL Activities зберігаються у базі даних SFMC як «Data Extensions».

Отже, модуль «Automation Studio» дозволяє автоматично виконувати вибірку даних та ці дані можуть автоматично подаватися як стартова група клієнтів у «Journey Builder».

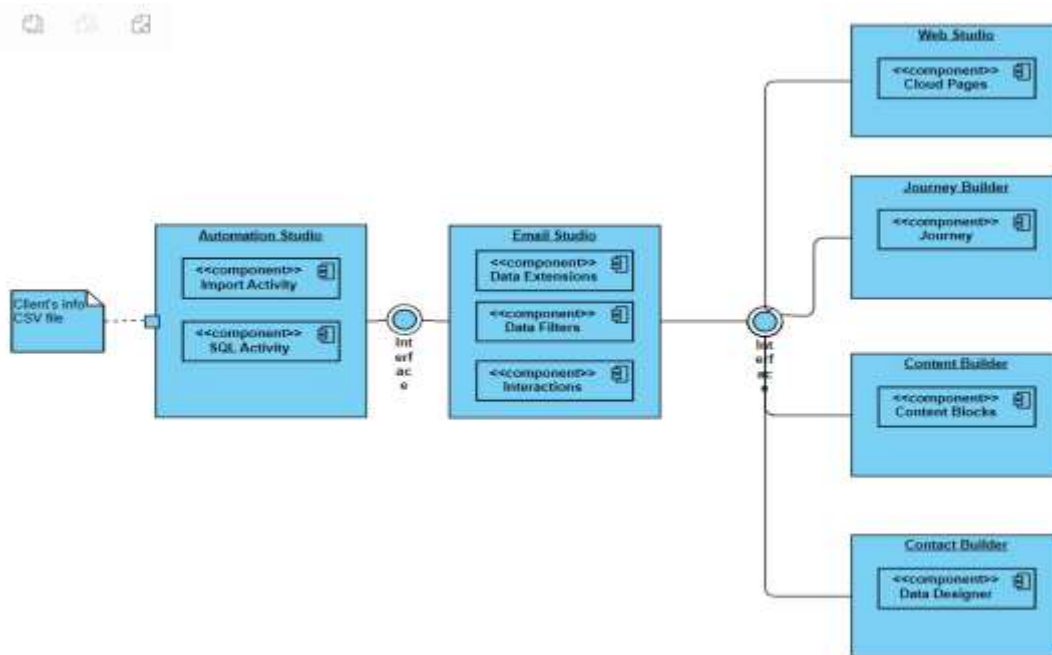


Рис. 4. Діаграма компонентів розробленого проекту

Кожен клас клієнтів, який сегментований за допомогою SQL Activity, відправляється до окремої серії подій, які створюються з огляду на те, чи є перспективним клієнт для компанії, чи ні (рис. 9).

В залежності від статусу клієнта та його поведінки можна коригувати роботу з ним згідно маркетингової

стратегії компанії. Наприклад, модуль «Content Builder», використовуючи дані зі «Data Extensions», дає можливість будувати персоналізований контент для кожного клієнта. Сам модуль написаний мовою SFMC AmpScript.

The screenshot shows the 'Automation Studio' interface for the 'MQL_Activity' group. The 'CONFIGURATION' tab is active, displaying the following details:

Properties	
Name	MQL_Activity
External Key	9B20FF7B-9095-4081-6582-A1AB713AF8DB
Folder Location	Query/Andrii_martynenko/KPI
Description	Marketing Qualified Leads MQLs. Subscribers who opened or clicked emails.

Target Data Extension	
Data Extension	MQL
Data Action	Overwrite

The 'ACTION LOG' tab shows the following SQL Query:

```

1 SELECT
2   s.SubscriberKey AS SubscriberKey,
3   s.EmailAddress AS EmailAddress,
4   o.TotalOpens,
5   c.TotalClicks,
6   (ISNULL(o.TotalOpens, 0) + ISNULL(c.TotalClicks, 0) * 2) AS BehaviorScore
7 FROM
8   _Subscribers s
9
10 LEFT JOIN (
11   SELECT
12     SubscriberKey,
13     COUNT(*) AS TotalOpens
14   FROM
15     _Open
16   GROUP BY
17     SubscriberKey
18 ) o ON s.SubscriberKey = o.SubscriberKey
19
20 LEFT JOIN (
  
```

Рис. 5. Створення групи активних клієнтів

The screenshot shows the 'Automation Studio' interface for the 'Potential_Clients_Activity' group. The 'CONFIGURATION' tab is active, displaying the following details:

Properties	
Name	Potential_Clients_Activity
External Key	4790C126-620C-4327-859F-7E542ED4822F
Folder Location	Query/Andrii_martynenko/KPI
Description	Subscribers who were sent emails from the last 7 days but didn't open or click.

Target Data Extension	
Data Extension	Potential_Clients
Data Action	Overwrite

The 'ACTION LOG' tab shows the following SQL Query:

```

1 SELECT
2   s.SubscriberKey AS SubscriberKey,
3   s.EmailAddress AS EmailAddress,
4   job.FullName AS JobName
5 FROM
6   _Send s
7 LEFT JOIN _Subscribers AS sub
8   ON sub.SubscriberKey = s.SubscriberKey
9 LEFT JOIN _Job AS job
10  ON job.JobID = s.JobID
11 WHERE
12   s.EventDate >= DATETIME('now', -7, GETDATE())
13 AND s.SubscriberKey NOT IN (
14   SELECT SubscriberKey
15   FROM
16     _Open
17   WHERE
18     EventDate >= DATETIME('now', -7, GETDATE())
19
20 UNION
  
```

Рис. 6. Створення другої групи клієнтів

The screenshot shows the 'Automation Studio' interface for the 'LowPotential_Clients_Activity' group. The 'CONFIGURATION' tab is active, displaying the following details:

Properties	
Name	LowPotential_Clients_Activity
External Key	9C21F5D9-2E25-443D-40AA-2B1378E2259A
Folder Location	Query/Andrii_martynenko/KPI
Description	Subscribers who experienced a bounce in the last 30-day or unsubscribed.

Target Data Extension	
Data Extension	LowPotential_Clients
Data Action	Overwrite

The 'ACTION LOG' tab shows the following SQL Query:

```

1 SELECT
2   s.SubscriberKey AS SubscriberKey,
3   s.EmailAddress AS EmailAddress
4 FROM
5   _Send s
6 LEFT JOIN _Subscribers AS sub
7   ON sub.SubscriberKey = s.SubscriberKey
8 INNER JOIN (
9   SELECT SubscriberKey
10  FROM
11    _Bounce
12  WHERE
13    EventDate >= DATETIME('now', -30, GETDATE())
14 UNION
15  SELECT SubscriberKey
16  FROM
17    _Unsubscribe
18  WHERE
19    UnsubscribeDate <= DATETIME('now', -30, GETDATE())
20
  
```

Рис. 7. Створення групи неактивних клієнтів

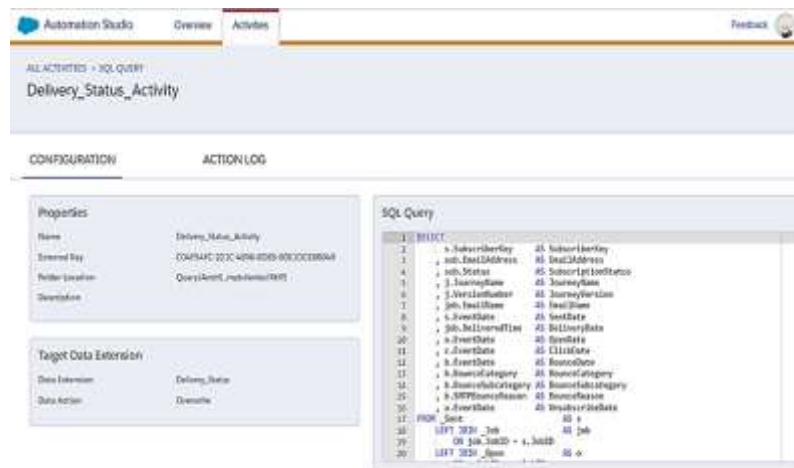


Рис. 8. Отримання статистики маркетингових розсилок

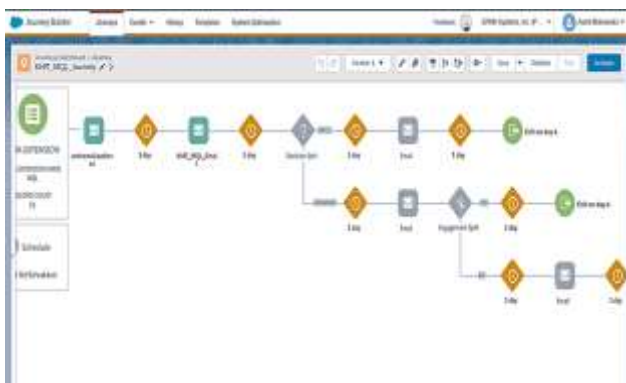


Рис. 9. Формування дій для кожної групи клієнтів

Для того, щоб створювати відповідні повідомлення в залежності від рівня активності клієнта з контентом маркетингового заходу, використовують мови HTML5, CSS3, AmpScript, SSJS. Отже, у результаті клієнт компанії отримує персоналізоване та динамічне відображення контенту. Але, коли дані клієнтів у «Data Extension» потрапляють до «Journey», вони стають статичними. Тут можуть виникнути незручності у побудові такої архітектури, яка б дозволяла динамічно відстежувати поведінку клієнтів. Тому, для динамічного зчитування інформації клієнтів було побудовано окрему базу даних у модулі «Contact Builder». У цій базі даних можна створювати з'єднання таблиць, використовуючи ключові поля таблиць, а також враховувати такі типи відношень, як: «один до одного»; «один до багатьох»; «багато до багатьох». У розглянутому прикладі дані клієнтів за розсилкою електронних листів отримують унікальний ключ «Subscriber Key». Цей ключ дозволяє під'єднатися до таблиці «Contacts». У результаті з'являється можливість створювати запити до «Contact Builder» і отримувати актуальну інформацію про клієнта.

При проектуванні структури платформи модуль «Web Studio» зазвичай використовується для побудови

динамічних та персоналізованих вебсторінок, які дозволяють клієнту у більш зручному форматі переглядати запропонований компанією контент та взаємодіяти з ним. Елементи «Web Studio» стають для компанії додатковим ресурсом збору та обробки інформації про клієнта. Також «Web Studio» за допомогою програмного коду об'єднується з різними модулями SFMC, здійснюється збір даних з кожного модуля, обробка даних та вносяться зміни.

Для зберігання контактів клієнтів, історії взаємодії з ними, а також для створення цільових аудиторій для маркетингових заходів використовується інструмент «Data Extensions» (DE). Також DE забезпечує персоналізовані та цілеспрямовані комунікації з клієнтами. Він доступний з двох модулів:

- Email Studio > Emails > Data Extensions;
- Audience Builder > Contact Builder > Data Extensions.

У рамках даної роботи розроблено додаток для автоматизації процесу пошуку та роботи з даними CRM SFMC. Розроблений вебдодаток «Data Extension Manager» на базі Cloud Page SFMC полегшує роботу з даними, забезпечуючи користувачам зручний і швидкий доступ до метаданих DE. Для побудови додатку були використані такі модулі SFMC.

«Cloud Pages» – це основний функціонал, логіка та інтерфейс користувача розроблені з використанням даного модуля. Під кожен окремий сценарій був розроблений компонент модуля. Для таких дій, як: вхід до системи, вихід із системи, додавання нового користувача та відображення головної сторінки були створені окремі вебсторінки.

Логіка подій відбувається через компонент «Controller Page», в якому відсутній інтерфейс користувача, прописані сценарії обробки даних взаємодії користувача з додатком.

«Email Studio» – модуль платформи для створення таблиць «Data Extension», які зберігають дані для роботи з додатком.

Модуль розроблено згідно паттерну Database Per Service (Database Pattern), кожен сервіс має власну базу даних. Для налаштування тригерної відправки повідомлення з токеном для входу в додаток було використано «Email Studio».

«Content Builder» – модуль створення файлу зображення, який використовує «Cloud Page» для відображення інтерфейсу користувача. Був розроблений електронний лист, який використовується для відправлення токена для входу в додаток.

Структура розробленого додатку представлена як діаграма компонентів та наведена на рис.10.

На рис.11 представлена діаграма послідовності, яка описує взаємодію користувача з різними елементами додатка при вході в систему.

Реалізовані такі події: 1) користувач запускає додаток з головної сторінки; 2) потім перевіряється стан сесії користувача з додатком; 3) робиться запит до бази даних, в якій зберігається токен з назвою та часом створення події, з головної сторінки додатка; 4) файлами Cookies порівнюються з даними; якщо сесія користувача є активною, то відкривається головна сторінка додатку, в іншому випадку користувач буде перенаправлений до сторінки входу в систему, де необхідно ввести своє ім'я та пароль; 5) введені дані

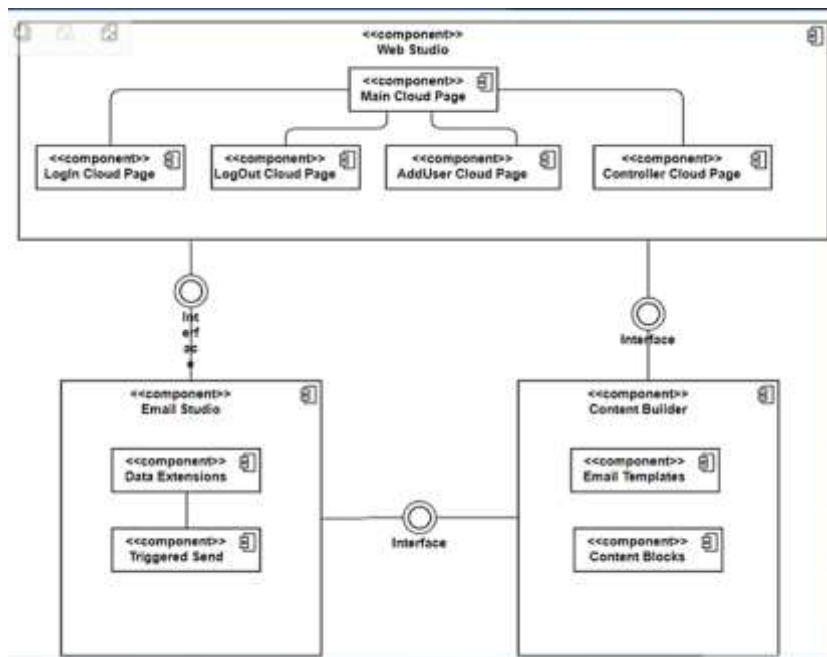


Рис. 10. Діаграма компонентів додатку роботи з DE

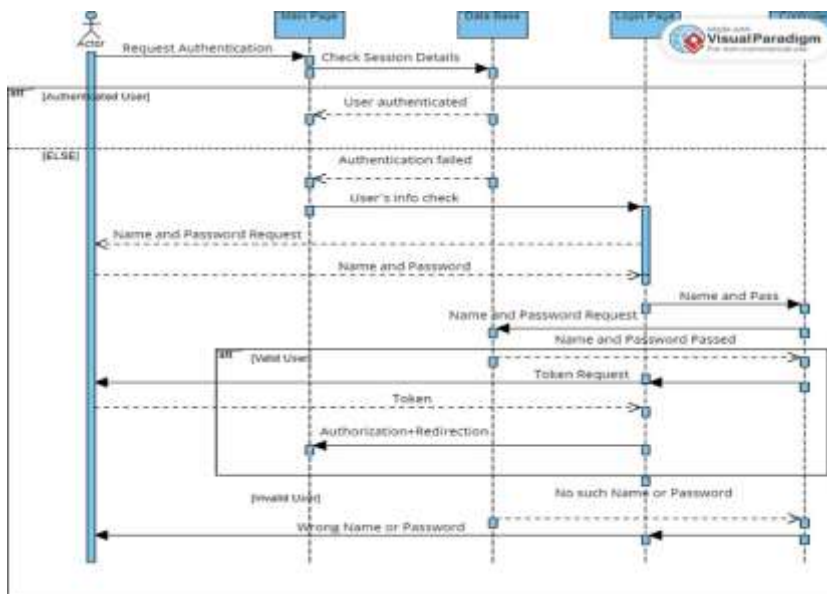


Рис. 11. Діаграма послідовності

потрапляють до контролера, який перевіряє валідність даних; 6) після успішної перевірки імені та пароллю, користувач отримує на електронну пошту лист з секретним токеном, який необхідно ввести у відповідне поле входу в систему; 7) після перевірки токenu контролер дає згоду щодо переходу користувача до головної сторінки додатку. Якщо ім'я або пароль користувача додатку, або токен не пройшли перевірку, то надається відповідне повідомлення на екрані. Користувач після входу в систему має можливість на головній сторінці додатку ввести в пошукове поле назву таблиці «Data Extension» та отримати таку інформацію: місце її розташування в системі, статистичну таблицю з основною інформацією про шукану DE та про всі DE, які розміщені в ієрархії папок. При відсутності шуканих даних користувач отримує відповідне повідомлення на цій сторінці.

Додаток розроблено з використанням ресурсів та можливостей платформи SFMC. Було використано мову програмування AMPScript, яка є вбудованою мовою платформи, та SSJS. Також використано інструмент WSPроху для зручного доступу до об'єктів платформи. WS – це WebSocket, який забезпечує спосіб створення вебдодатків, що у реальному часі підтримують двонаправлений зв'язок з клієнтами та серверами. WSPроху у SFMC – це об'єкт сценарію, який дозволяє створювати зв'язок з більшістю доступних об'єктів SOAP через автентифікацію платформи. Для здійснення викликів через платформу всередині Script Activities або CloudPages об'єкт WSPроху використовує синтаксис SSJS і JSON. У середовищі обміну повідомленнями чи за межами платформи SFMC він не працює. WSPроху збільшує швидкість викликів API, зберігаючи встановлений платформою рівень безпеки даних.

Розробка додатку відбувалася у середовищі Visual Studio Code з розширенням MCFS [AMPScript], яке забезпечує підключення коду Visual Studio безпосередньо до облікового запису MC, увімкнення підсвічування синтаксису для AMPScript та ін.

Висновки. Розроблена архітектура Marketing Cloud Salesforce CRM, яка призначена для поведінкової сегментації клієнтів. Використання такої архітектури надає компанії можливості ефективного управління маркетинговими заходами відповідно до унікальних потреб кожного сегмента клієнта, а також забезпечує персоналізоване спілкування з клієнтами. У результаті буде отримано значне покращення процесів залучення нових клієнтів, утримання існуючих, а також підвищення ефективності програм підтримки постійних клієнтів. Персоналізовані стратегії, які розроблені на основі проведеної поведінкової сегментації, сприятимуть підвищенню залучення аудиторії, забезпечать більш ефективне використання маркетингових ресурсів та підвищать загальну задоволеність клієнтів. Компанія, яка буде використовувати додаток, матиме можливість відстежувати зміни у попиті на свій товар та реагувати на них у реальному часі. Іншими словами, викорис-

тання платформи Salesforce Marketing Cloud з розробленою архітектурою створює умови для вдосконалення взаємодії з кожним клієнтом, роблячи їхній досвід персональним.

Отже, розроблено веборієнтований додаток для покращення роботи користувачів платформи з даними своїх клієнтів, що зберігаються в «Data Extensions». Використовуючи додаток з Salesforce Marketing Cloud, компанії можуть ефективно спрямовувати свої маркетингові зусилля на основі сегменти ринку, що дозволить зменшити ризик помилок у здійсненні різних заходів і збільшити кількість покущів товарів (клієнтів компанії).

Список використаної літератури

1. *The Original Cloud-Based CRM Platform – ITChronicles*. URL: <https://itchronicles.com/crm/the-original-cloud-based-crm-platform/> (дата звернення: 30.10.2023).
2. *CRM і його види, типи, призначення – Worksection*. URL: <https://worksection.com/blog/crm-theory.html> (дата звернення: 30.10.2023).
3. *The Importance of Customer Data Management in 2023 and beyond*. URL: <https://kulahub.com/2023/04/07/the-importance-of-customer-data-management-in-2023-and-beyond> (дата звернення: 30.10.2023).
4. *Getting More Out of Your Business With Customer Segmentation*. URL: <https://www.salesforce.com/products/marketing-cloud/best-practices/customer-segmentation/> (дата звернення: 19.11.2023).
5. *Email Marketing Strategies to Amplify Your Results*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/14-email-marketing-strategies-amplify-your-results-husam-jandal> (дата звернення: 19.11.2023).
6. *How can social media work for your business?* URL: <https://logicdigital.co.uk/how-can-social-media-work-for-your-business/> (дата звернення: 18.11.2023).
7. *The Importance Of Social Media In Business: What You Need To Know*. URL: <https://www.digitallogic.co/blog/the-importance-of-social-media-in-business/> (дата звернення: 19.11.2023).
8. *Benefits of Optimized Reporting and Analytics in an Organization*. URL: <https://www.bluelinker.com/blog/4-benefits-of-optimized-reporting-and-analytics-in-an-organization/> (дата звернення: 19.11.2023).
9. *The Significance of Mobile Marketing*. URL: <https://phonexa.com/blog/the-significance-of-mobile-marketing/> (дата звернення: 19.11.2023).
10. *What is Compliance and Why SMBs Should Care About It*. URL: <https://www.bemopro.com/cybersecurity-blog/what-is-compliance>, (дата звернення: 19.11.2023).
11. *Salesforce Help Documentation. Salesforce Marketing Cloud*. URL: https://help.salesforce.com/s/articleView?id=sf.mc_overview_marketing_cloud.htm&type=5 (дата звернення: 19.11.2023).
12. *CloudPages In Marketing Cloud*. URL: <https://showerthinking.com/cloudpages-in-marketing-cloud/> (дата звернення: 19.11.2023).

References (transliterated)

1. *The Original Cloud-Based CRM Platform – ITChronicles*. Available at: <https://itchronicles.com/crm/the-original-cloud-based-crm-platform/> (accessed 30.10.2023).
2. *CRM і його види, типи, призначення – Worksection* [CRM and its types, types, purpose – Worksection]. Available at: <https://worksection.com/blog/crm-theory.html> (accessed 30.10.2023).
3. *The Importance of Customer Data Management in 2023 and beyond*. Available at: <https://kulahub.com/2023/04/07/the-importance-of-customer-data-management-in-2023-and-beyond> (accessed 30.10.2023).
4. *Getting More Out of Your Business With Customer Segmentation*. Available at: <https://www.salesforce.com/products/marketing-cloud/best-practices/customer-segmentation/> (accessed 19.11.2023).

5. *Email Marketing Strategies to Amplify Your Results*. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/14-email-marketing-strategies-amplify-your-results-husam-jandal> (accessed 19.11.2023).
6. *How can social media work for your business?* Available at: <https://logicdigital.co.uk/how-can-social-media-work-for-your-business/> (accessed 18.11.2023).
7. *The Importance Of Social Media In Business: What You Need To Know*. Available at: <https://www.digitallogic.co/blog/the-importance-of-social-media-in-business/> (accessed 19.11.2023).
8. *Benefits of Optimized Reporting and Analytics in an Organization*. Available at: <https://www.bluelinkerp.com/blog/4-benefits-of-optimized-reporting-and-analytics-in-an-organization/> (accessed 19.11.2023).
9. *The Significance of Mobile Marketing*. Available at: <https://phonexa.com/blog/the-significance-of-mobile-marketing/>, (accessed 19.11.2023).
10. *What is Compliance and Why SMBs Should Care About It*. Available at: <https://www.bemopro.com/cybersecurity-blog/what-is-compliance>, (accessed 19.11.2023).
11. *Salesforce Help Documentation. Salesforce Marketing Cloud*. Available at: https://help.salesforce.com/s/articleView?id=sf.mc_overview_marketing_cloud.htm&type=5 (accessed 19.11.2023).
12. *CloudPages In Marketing Cloud*. Available at: <https://showerthinking.com/cloudpages-in-marketing-cloud/> (accessed 19.11.2023).

Надійшла (received) 22.11.2023

UDC 004.9: 658.8

V. V. MOSKALENKO, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Information Systems and Technologies; Kharkiv, Ukraine, e-mail: valentinosk17@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9994-5404>

A. O. MATVIENKO, Master's degree, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: andrii.matvienko@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6346-8510>

N. G. FONTA, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Intelligent Management Technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: natalia.fonta@dataart.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5593-1409>

RESEARCH AND DESIGN OF THE MARKETING CLOUD SALESFORCE CRM ARCHITECTURE DEPENDING ON THE COMPANY'S MARKETING STRATEGY

The purpose of the study is to increase the level of effective attraction of new customers and retention of the company's existing customer base through the implementation of innovative marketing strategies. The expediency of using the concept of customer relationship management (CRM) and the use of CRM-class information systems to achieve the goal has been proven. The CRM platform Salesforce Marketing Cloud, which belongs to cloud types of information systems, was studied. A description of the Salesforce Marketing Cloud business logic is given, which includes decision-making based on analytical data, customer segmentation, automation of an individual approach to customers with the aim of increasing customer loyalty and increasing company revenue. Salesforce Marketing Cloud provides an opportunity to create and manage personalized marketing activities, interact with customers through various channels, analyze the effects of marketing efforts for continuous improvement of the company's marketing strategies. The functionality and features of the main components of Salesforce Marketing Cloud were studied. Salesforce Marketing Cloud allows you to effectively manage email marketing, mobile marketing, social media campaigns and other types of marketing. Salesforce Marketing Cloud empowers companies to create and manage personalized marketing efforts, engage with customers across multiple channels, and analyze their marketing efforts for continuous improvement. Salesforce Marketing Cloud architecture was designed for behavioral segmentation of the company's customers. A web application has been developed to improve the platform users' experience with customer data stored in Data Extensions. To automate customer segmentation based on their behavioral data, Automation Studio was used, SQL queries were built, and Data Views system data tables were used. The developed architecture of Marketing Cloud Salesforce CRM based on behavioral segmentation is an important tool for the implementation of the company's marketing strategy, ensuring the successful attraction and retention of customers, as well as for achieving strategic goals.

Keywords: customer relationship management, behavioral segmentation, salesforce marketing cloud, architecture, database, data extension, automation studio, visual studio code.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Москаленко Валентина Володимирівна, Moskalenko Valentyna Volodymyrivna

Автор 2 / Author 2: Матвієнко Андрій Олександрович, Matvienko Andriy Oleksandrovich

Автор 3 / Author 3: Фонта Наталія Григорівна, Fonta Nataliia Grygorivna

О. С. МЕЛЬНИКОВ, кандидат економічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна, e-mail: Oleg.Melnikov@kpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2409-4983>

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРИВАЛОСТІ АУКЦІОНІВ ПРИ НАЯВНОСТІ ЧАСОВИХ ВИТРАТ

У статті розглядається вплив тривалості конкурсних торгів на очікуваний дохід їх організатора. Подовження тривалості торгів двояко впливає на їх результати. З одного боку, це дозволяє залучити до участі в торгах більшу кількість учасників, і конкуренція між ними підвищує шанси аукціоніста на отримання кращої ціни. З іншого боку, затягування торгів затримує отримання грошей (для аукціонів) або необхідних товарів чи послуг (для тендерів), а час має цінність сам по собі. Вплив цих двох факторів, які діють у протилежних напрямках, наводить на думку про існування оптимальної тривалості процесу торгів. В роботі розроблено економіко-математичну модель проведення торгів, яка формалізує ці міркування та надає можливість визначення їх оптимальної тривалості. Прибуття учасників для участі в торгах розглядається як Пуассонівський процес. Кожний учасник характеризується власною оцінкою вартості виставленого на торги об'єкту. Ці оцінки вважаються незалежними випадковими величинами із спільним параметричним розподілом. В цих припущеннях теорема Майерсона про еквівалентність доходу надає можливість прогнозувати очікувані результати аукціоніста в залежності від кількості учасників торгів незалежно від організаційної форми їх проведення. На цій основі можна порівняти переваги і витрати, пов'язані із збільшенням часу для прийому заявок на участь в торгах, що дає можливість визначити їх оптимальну тривалість. Отримані умови оптимальності мають змістовну і інтуїтивно зрозумілу економічну інтерпретацію. В практичних умовах для оцінки оптимальної тривалості конкурентних торгів запропоновано використання методів Монте-Карло на основі емпіричного розподілу цін попиту чи пропозиції. Практична реалізація запропонованого алгоритму може покращити економічні показники діяльності аукціоніста, що є особливо актуальним для державного сектору економіки.

Ключові слова: аукціон, тривалість, оптимізація, прогнозування, торги, порядкова статистика, Пуассонівський процес

Вступ. Проблема ефективного використання державних коштів і матеріальних активів завжди привертала значну увагу економістів, політиків, журналістів, громадськості. Одним із шляхів забезпечення ефективності державного сектору економіки є використання конкурсних механізмів господарської діяльності. Прикладами таких механізмів є аукціони та тендери, також відомі під загальною назвою «конкурсні торги».

Аукціони визнані як один із найефективніших способів продажу продукції в умовах недосконалої конкуренції. Їх популярність значно зросла після того, як з появою електронних торгових майданчиків різко знизилася витрати на їх організацію та проведення. У державному секторі вони використовуються для приватизації, оренди державного майна, продажу радіочастот для телекомунікаційних мереж тощо.

Ще більшого поширення набуло використання тендерів (зворотних аукціонів) для закупівель. У більшості країн світу це основний інструмент для забезпечення постачань товарів, надання послуг та виконання робіт у державному секторі. В Україні правила проведення регламентуються Законом «Про публічні закупівлі» [1], який передбачає проведення електронних тендерів для всіх, крім найбільш тривіальних державних закупівель (за деякими винятками).

Найчастіше переможця конкурсних торгів обирають за ціновим критерієм.

Існує велика різноманітність процедур проведення торгів. Поширеними є англійські, японські та голландські аукціони, аукціони із закритими пропозиціями тощо [2]. Вибір конкретної процедури та певних організаційних параметрів (наприклад, початкової ціни) опосередковано впливає на стратегічну поведінку учасників торгів, що, у свою чергу, змінює очікувані результати аукціону. Задача оптимізації торгів полягає

у виборі таких процедур і налаштувань, використання яких наводило б до найкращого результату для організатора торгів або для суспільства в цілому.

1. Аналіз літератури і постановка задачі. Серед важелів впливу на поведінку учасників торгів слід відзначити:

- встановлення стартової ціни аукціону;
- схему винагороди (так, на більшості аукціонів ціна контракту дорівнює ставці переможця, але на аукціоні Вікрі вона встановлюється на рівні другої найкращої пропозиції);
- плату за участь у торгах (у широкому розумінні до неї також повинні входити витрати на підготовку тендерної документації, технічне забезпечення тощо);
- величину кроку зміни ціни;
- терміни проведення торгів тощо.

Серед них перші два були всебічно вивчені в літературі з теорії аукціонів [3–5]. Впливу інших інструментів на результати торгів приділялося значно менше уваги. Стосовно строків проведення аукціону, в роботі [6] розглядалось питання, як кінцевий термін реалізації товару може вплинути на вибір продавця між його продажем за фіксованою ціною та проведенням порівняно дорогого аукціону. В роботі [7] досліджувалась проблема оптимальної тривалості аукціону в інституційному контексті фондових ринків.

Метою даного дослідження є вдосконалення моделі визначення оптимальної тривалості торгів, запропонованої автором у [8].

2. Модель проведення торгів при наявності часових витрат. Збільшення тривалості торгів має подвійний вплив на їх очікувані результати з точки зору організатора.



Вигода від використання конкурсних процедур створюється за рахунок залучення широкого кола покупців і продавців. Конкуренція між ними дає аукціоністові можливість отримати кращу ціну. Подовження тривалості аукціону має призвести до збільшення кількості учасників, що, у свою чергу, покращить очікуваний результат.

З іншого боку, таке затягування затримує отримання грошей від реалізації продукції або придбання необхідних товарів, а час завжди має цінність сам по собі. Це також збільшує ризики, пов'язані з можливою зміною ринкових умов, і ускладнює планування.

Компромід між цими суперечливими міркуваннями можна формалізувати за допомогою наступної моделі. Для визначеності, розглянемо випадок аукціону, хоча модель може бути застосована і до тендерів із мінімальними змінами.

2.1. Загальна схема проведення торгів. Припустимо, що продавець проводить аукціон для продажу одиниці товару за найвищою ціною. Заявки від потенційних покупців, індексованих через i , приймаються протягом періоду часу $[0, t]$. При цьому аукціоніст несе витрати, пропорційні тривалості торгів: $C(t) = ct$.

Кожен учасник торгів має певну резервовану ціну v_i (тобто максимальну ціну, яку він готовий сплатити за товар). Вона невідома ані покупцеві, ані іншим учасникам торгів. Проте, будемо вважати, що резервовані ціни окремих учасників є незалежними однаково розподіленими на інтервалі $[0, V]$ випадковими величинами. Інтегральна функція цього розподілу $F(x) = P\{v_i \leq x\}$ є відомою всім учасникам.

Кожний учасник надає аукціоністу свою цінову пропозицію b_i , яка, вочевидь, має залежати від v_i . Зокрема, із міркувань особистої раціональності випливає, що $b_i \leq v_i$. Правила аукціону визначають, як обирається переможець і яку суму він сплачує: $(b_1, \dots, b_n) \rightarrow (i^*, p^*)$. Моделювання цього перетворення буде описано у наступному розділі.

Нарешті, припустимо, що надходження пропозицій до аукціоніста підпорядковується процесу Пуассона з інтенсивністю λ . Тоді ймовірність отримати рівно n заявок протягом часу t буде складати:

$$\pi(n, t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}. \quad (1)$$

2.2. Моделювання поведінки учасників торгів. Співвідношення між резервованими цінами покупців та їхніми пропозиціями залежить від схеми аукціону та є дуже складним питанням, яке було предметом інтенсивних досліджень в математичній економіці та теорії ігор протягом останніх 60 років. Наведемо стислий огляд теоретичних результатів, важливих для подальшого викладу матеріалу.

Два формати конкурентних торгів, які найчастіше використовуються в державному секторі, це аукціони першої ціни із закритими пропозиціями (ПЦЗП) та англійські аукціони. На аукціонах ПЦЗП учасники подають свої заявки аукціоністу в закритому вигляді (історично, у запечатаних конвертах). У заздалегідь

визначений час конверти розкриваються і переможцем оголошується учасник, що запропонував найкращу ціну, яку він в результаті і сплачує.

На англійських аукціонах аукціоніст встановлює стартову ціну. Учасники торгів можуть запропонувати кращу ціну (зазвичай із визначеним мінімальним підвищенням). Торги припиняються, коли залишиться лише один учасник або коли закінчиться відведений на торги час. Переможець сплачує запропоновану ним ціну. Це основний формат публічних закупівель (реверсивних аукціонів) в Україні, які проводяться в електронній формі за правилами, визначеними в [1].

Для виграшу в англійському аукціоні переможець має перебити ціну передостаннього учасника. Учасникам доцільно продовжувати участь в торгах, доки їх резервована ціна перевищує поточну. Отже, якщо не враховувати дискретність зміни цін, виграшна ставка повинна дорівнювати другій зверху резервованій ціні учасників аукціону.

У впливовій статті [9] В. Вікрі зауважив, що той самий результат можна отримати набагато простіше на аукціоні другої ціни із закритими пропозиціями (ДЦЗП), де переможець платить ціну, що дорівнює другій найбільшій з поданих пропозицій. Він також довів, що за такої схеми торгів домінуючою стратегією для всіх учасників є «відверта» стратегія, тобто подання пропозиції на рівні своєї резервованої ціни. Це також звільняє учасників аукціону від необхідності фізично бути присутнім на заході.

На аукціонах ПЦЗП відверта стратегія не може бути оптимальною, оскільки вона призводить до нульового виграшу для всіх учасників торгів. Таким чином, ставки учасників будуть нижчими за їхні резервовані ціни. Найважливішим результатом теорії аукціонів є теорема Майерсона про еквівалентність доходу [3]. Вона стверджує, що (за певних технічних припущень) очікувана ціна, яку покупець заплатить у всіх наведених вище схемах аукціону, буде однаковою. Більш того, аукціоніст не може розраховувати на отримання кращих результатів, використовуючи будь-яку іншу можливу процедуру проведення торгів. Ретельний розгляд цих результатів можна знайти в [10].

Теорема про еквівалентність доходу дозволяє абстрагуватися від специфіки аукціонних процедур, які фактично використовуються в тих чи інших умовах. Без втрати загальності можна припустити, що аукціон проводиться за схемою ДЦЗП, де учасникам торгів оптимально застосовувати відверту стратегію. Отже, ціна продажу дорівнюватиме другій найвищій резервованій ціні учасників торгів.

2.3. Прогнозування продажною ціни. У теорії ймовірностей k -те найменше значення $x_{(k)}$ випадкового вектору $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ відоме як k -та порядкова статистика. Якщо компоненти вектору \mathbf{x} є незалежними та однаково розподіленими, то щільність розподілу k -ї порядкової статистики визначається як

$$f_{(k)}(x) = \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} f(x) \times \times [F(x)]^{k-1} [1-F(x)]^{n-k}, \quad (2)$$

де $F(x)$ та $f(x)$ – інтегральна функція та щільність розподілу компонент вектору x , відповідно.

Міркування, розглянуті в попередньому розділі, означають, що ціна продажу $p \in (n-1)$ -ю порядковою статистикою $v_{(n-1)}$ вектору резервованих цін учасників торгів $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$. З рівняння (2) випливає, що її щільність розподілу визначається як

$$f_p(x, n) = n(n-1)[F(x)]^{n-2}[1-F(x)]f(x), \quad (3)$$

У формулі (3) мається на увазі, що $n \geq 2$ (інакше $v_{(n-1)}$ не визначено). Якщо $n=0$, то немає жодного учасника торгів, а якщо $n=1$, то немає конкуренції. У контексті державного сектору економіки українське законодавство передбачає, що в обох цих випадках торги мають бути скасовані та перенесені. Отже, будемо вважати, що в обох цих випадках продукт не буде проданий і продавець не отримає доходу (але все одно буде нести витрати).

На рис. 1 показана щільність розподілу ціни продажу для рівномірного $U[0,1]$ (рис. 1, а) і нормального $N\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{6}\right)$ (рис. 1, б) розподілу резервованих цін покупців. Параметри нормального розподілу обрано таким чином, щоби за правилом трьох сигм основна частина розподілу буде зосереджена на одиничному інтервалі і результати було легко порівняти із випадком рівномірного розподілу.

Для стандартного рівномірного розподілу $F(x) = x$, $f(x) = 1$ і пряма підстановка цих функцій у формулу (3) показує, що ціна реалізації p буде мати бета-розподіл з параметрами $(n-1, 2)$. Для нормального випадку розподіл продажною ціни не може бути вираженим в елементарних функціях і був розрахований чисельно.

Як видно з графіків, збільшення кількості учасників змщує щільність ціни реалізації вправо, тобто в область вищих цін.

Формула (3) дозволяє обчислити умовне очікування ціни закупівлі в залежності від кількості учасників $n \geq 2$ як

$$\bar{p}_n = M[p | n] = \int_0^v x f_p(x, n) dx. \quad (4)$$

Наприклад, для стандартного рівномірного розподілу резервованих цін

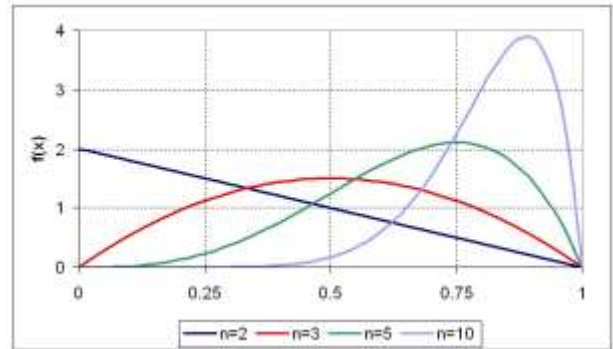
$$\bar{p}_n = \frac{n-1}{n+1} \quad (5)$$

за властивостями бета-розподілу. На рис. 2 показано очікувану ціну продажу як функцію кількості учасників торгів і розподілу їхніх резервованих цін.

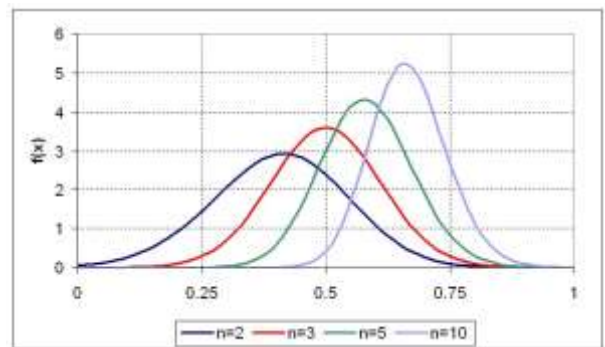
Проте, кількість учасників торгів є випадковою величиною з розподілом, визначеним формулою (1), який в свою чергу залежить від тривалості аукціону. Поєднуючи формули (1) і (4), за законом повної ймовірності отримуємо такий вираз для очікуваної ціни продажу як функції від тривалості торгів:

$$\begin{aligned} \bar{p}(t) &= \sum_{n=2}^{\infty} \pi(n, t) \bar{p}_n \\ &= \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \int_0^v x f_p(x, n) dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Зауважте, що підсумовування у формулі (6) починається з $n=2$, оскільки для $n < 2$ продукт не буде продано і дохід продавця дорівнюватиме нулю, як обговорювалося вище.



а



б

Рис. 1. Розподіл продажною ціни в залежності від кількості учасників торгів для різних розподілів резервованих цін: а – рівномірний $U[0,1]$, б – нормальний $N(1/2, 1/6)$

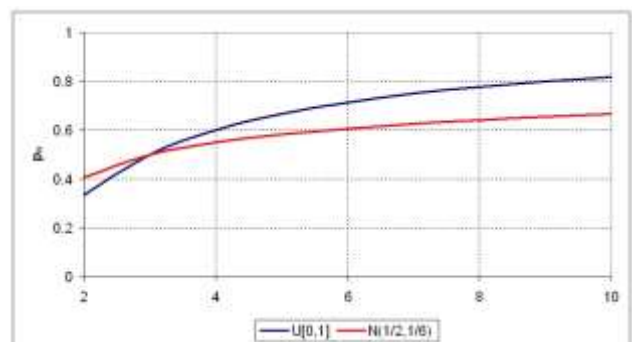


Рис. 2. Очікувана ціна реалізації в залежності від кількості учасників торгів

3. Оптимізація тривалості торгів. У термінах визначених вище змінних задачу оптимізації тривалості аукціону можна сформулювати так:

$$V(t) = \bar{p}(t) - ct \rightarrow \max_t. \quad (7)$$

Перший додатак у наведеному вище виразі є зростаючою функцією часу, обмеженою зверху значенням V . Другий додатак лінійно зростає з часом. Отже, існує єдине рішення цієї оптимізаційної задачі. На рис. 3 показано цільову функцію для стандартного рівномірного розподілу резервованих цін учасників торгів.

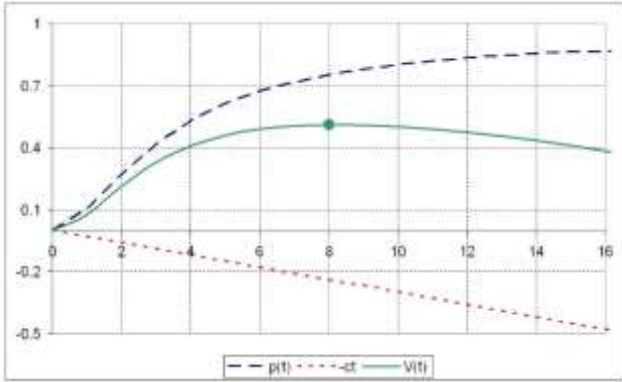


Рис. 3. Визначення оптимальної тривалості торгів

Необхідною умовою оптимальності для задачі (7) виглядає так:

$$\frac{d\bar{p}(t)}{dt} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\partial \pi(n,t)}{\partial t} \bar{p}_n = c. \quad (8)$$

Формула (8) має досить стандартну економічну інтерпретацію: очікувана гранична вигода від збільшення тривалості аукціону на одиницю часу повинна дорівнювати граничній вартості цього часу.

Формулу (8) можна перетворити у наступний спосіб. З формули (1) випливає, що

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi(n,t)}{\partial t} &= \lambda \frac{n(\lambda t)^{n-1} e^{-\lambda t}}{n!} - \lambda \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} = \\ &= \lambda(\pi(n-1,t) - \pi(n,t)). \end{aligned} \quad (9)$$

Підставивши останнє співвідношення в формулу (9), отримаємо:

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{\infty} (\pi(n-1,t) - \pi(n,t)) \bar{p}_n &= \frac{c}{\lambda}; \\ \sum_{n=1}^{\infty} \pi(n,t) \bar{p}_{n+1} - \sum_{n=2}^{\infty} \pi(n-1,t) \bar{p}_n &= \frac{c}{\lambda}; \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} (p_{n+1} - p_n) &= \frac{c}{\lambda}, \end{aligned} \quad (10)$$

де вважається, що $p_1 = 0$. Це дозволяє отримати більш змістовну інтерпретацію. Вираз у лівій частині формули (10) – це очікуваний приріст ціни продажу від наявності додаткового учасника аукціону. Для розподілу Пуассона величина, обернена інтенсивності λ , є середнім інтервалом між подіями. Отже, вираз c/λ у правій частині формули (10) є середньою вартістю очікування додаткового учасника торгів. Таким чином, оптимальна тривалість аукціону є такою, що очікуваний виграш від залучення до торгів додаткового учасника торгів дорівнює вартості часу на очікування цього учасника.

Обчислення цільової функції в (7) вимагає знання розподілу резервованих цін покупців, отримати які може бути проблематично. Якщо є джерела інформації про діапазон прийнятних цін, такі як каталоги, оголошення в соціальних мережах тощо, для оцінки очікуваної ціни реалізації може бути зручніше застосувати методи Монте-Карло. Маючи список цін, можна скласти з неї випадкову вибірку з n елементів і взяти другу найвищу ціну як оцінку результату змодельованого аукціону. Повторення цієї процедури та усереднення результатів дадуть бажані оцінки.

Висновки. У роботі запропонована економіко-математична модель, яка дозволяє оцінити вплив тривалості конкурсних торгів на їх очікувані результати для аукціоніста. На цій основі розроблено методіку визначення їх оптимальної тривалості, застосовну для широкого кола організаційних механізмів проведення торгів. Отримані формули мають змістовну та прозору економічну інтерпретацію. В умовах недосконалої інформації про ринкове середовище прогнозування результатів торгів і оцінка оптимальних термінів їх проведення може бути здійснена за допомогою методів Монте-Карло.

Запровадження методіки сприятиме спрощенню та підвищенню ефективності конкурсних процедур, що є особливо важливим для державного сектору економіки в умовах військового часу. В комерційному секторі модель може бути актуальною, зокрема, для онлайн аукціонів з розміщення реклами, які відбуваються на постійній основі у реальному масштабі часу [12]. Адаптація моделі до цього середовища є цікавою темою для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Про публічні закупівлі: Закон України від 25.12.2015 р. № 922-VIII: станом на 01.01.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19> (дата звернення: 29.11.2023).
2. Мельников О. С. Порівняльний аналіз існуючих організаційних механізмів проведення торгів. *Публічне управління: теорія та практика*. Харків: ДокНаукаДержУпр, 2012. №1 (9). С. 130–134. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2897/1/Melnykov_2012_Porivnialnyi%20analiz.pdf (дата звернення: 29.11.2023).
3. Myerson R. Optimal auction design. *Math. Oper. Res.* 1981, Vol. 6 (1). P. 58–73.
4. Riley J., Samuelson W. Optimal Auctions. *Amer. Econ. Review.* 1981. Vol. 71. P. 381–392.
5. Bulow J., Roberts J. The simple economics of optimal auctions. *J. Polit. Econ.* 1989. Vol. 97 (5). P. 1060–1090.
6. Zhang H. The optimal sequence of prices and auctions. *European Economic Review.* 2021, 133 (2021) 103681. URL: <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2021> (дата звернення: 29.11.2023).
7. Jusselin P., Mastroliia T., Rosenbaum M. Optimal Auction Duration: A Price Formation Viewpoint. *Operations Research.* 2021. Vol. 69 (6), 1734–45.
8. Мельников О. С. Оптимізація строків проведення конкурсних торгів. *Збірник матеріалів IV Міжнародної конференції «Стратегія інноваційного розвитку економіки: бізнес, наука, освіта»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. С. 184–186. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/39777/1/Melnykov_Optimizatsiia_strokov_2012.pdf (дата звернення: 29.11.2023).
9. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *Journal of Finance.* 1961. Vol. 16. P. 8–37.
10. Klemperer P. *Auctions: Theory and Practice*. Princeton: Princeton University Press, 2004. 256 p.

11. Weisstein E. W. Order Statistic. *MathWorld – A Wolfram Web Resource*. URL: <https://mathworld.wolfram.com/OrderStatistic.html> (дата звернення: 29.11.2023).
12. Tunuguntla S., Hoban P. R. A Near-Optimal Bidding Strategy for Real-Time Display Advertising Auctions. *J. of Marketing Research*. 2021. Vol. 58 (1). P. 1–21. DOI: 10.1177/002224372096854.
6. Zhang H. The optimal sequence of prices and auctions. *European Economic Review*. 2021, 133 (2021) 103681. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2021> (accessed 29.11.2023).
7. Jusselin P., Mastrolia T., Rosenbaum, M. Optimal Auction Duration: A Price Formation Viewpoint. *Operations Research*. 2021, vol. 69 (6), pp. 1734–45.
8. Melnikov, O. S. Optymizatsiia strokiv provedennia konkursnykh torhiv [Optimization of Deadlines for Competitive Bidding Procedures]. Zbirnyk materialiv IV Mizhnarodnoyi konferencii "Strategiya innovatsiynogo rozvytku ekonomyky: biznes, nauka, osvita" [Proc. of the 4th Int. Conf. "Strategy of innovative development of the economy: business, science, education"]. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2012, pp. 184–186. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/39777/1/Melnikov_Optymizatsiia_strokiv_2012.pdf (accessed 29.11.2023).
9. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *Journal of Finance*. 1961, vol. 16, pp. 8–37.
10. Klemperer, P. *Auctions: Theory and Practice*. Princeton: Princeton University Press Publ., 2004. 256 p.
11. Weisstein, E. W. Order Statistic. *MathWorld – A Wolfram Web Resource*. URL: <https://mathworld.wolfram.com/OrderStatistic.html> (accessed 29.11.2023).
12. Tunuguntla S., Hoban P. R. A Near-Optimal Bidding Strategy for Real-Time Display Advertising Auctions. *J. of Marketing Research*. 2021, vol. 58(1), pp. 1–21. DOI: 10.1177/002224372096854.

References (transliterated)

1. Pro publichni zakupivli: Zakon Ukrainy vid 25.12.2015 №922-VIII: stanom na 01.01.023 [On Public Procurement: Law of Ukraine dated 25.12.2015 №922-VIII: as of 01.01.023]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19> (accessed 29.11.2023).
2. Melnikov O. S. Porivnialnyi analiz isnuiuchykh orhanizatsiinykh mekhanizmv provedennia torhiv [Comparative Analysis of Different Organizational Mechanisms for Competitive Bidding]. *Publichne upravlinnya: teoriya ta praktyka* [Public administration: theory and practice]. Kharkiv, DocNaukDerzhUpr Publ., 2012. Vol. 1 (9), pp.130–134. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/2897/1/Melnikov_2012_Porivnialnyi%20analiz.pdf (accessed 29.11.2023).
3. Myerson R. Optimal auction design. *Math. Oper. Res.* 1981, vol. 6 (1), pp. 58–73.
4. Riley J., Samuelson W. Optimal Auctions. *Amer. Econ. Review*. 1981, vol. 71, pp. 381–392.
5. Bulow J., Roberts J. The simple economics of optimal auctions. *J. Polit. Econ.* 1989, Vol. 97 (5), pp. 1060–1090.

Надійшло (received) 01.12.2023

UDC 330.46

O. S. MELNIKOV, Candidate of Economic Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: Oleg.Melnikov@kpi.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2409-4983>.

OPTIMIZATION OF THE AUCTION DURATION IN THE PRESENCE OF TIME-DEPENDANT COSTS

This paper examines the influence of the duration of auctions or tenders on the expected gain of their organizer. Extending the duration of bidding affects auction results in two ways. On the one hand, it allows attracting a larger number of participants to the auction, and the competition between them increases the chances of the auctioneer to get a better price. On the other hand, delaying bids delays the receipt of money (for auctions) or required goods or services (for tenders), and time has value in itself. The influence of these two factors, which act in opposite directions, suggests the existence of an optimal duration of the bidding process. The paper develops a mathematical model of bidding, which formalizes these considerations and provides an algorithm to determine their optimal duration. The arrival of bidders willing to participate in the auction is modeled as a Poisson process. Each participant is characterized by his own assessment of the value of the object put up for auction. These estimates are assumed to be independent identically distributed random variables drawn from some parametric distribution. Under these assumptions, Myerson's revenue equivalence theorem makes it possible to predict the expected results of the auction as a function of the number of bidders, regardless of the auction rules. On this basis, it is possible to compare the benefits and costs associated with changing the duration of time for accepting applications for participation in bidding, which makes it possible to determine its optimal value. The obtained optimality conditions have a meaningful and intuitive economic interpretation. For practical applications, the use of Monte Carlo methods based on the empirical distribution of bid and ask prices is proposed. The practical implementation of the proposed algorithm can improve the economic performance of the auctioneer, which is especially relevant for the public sector of the economy.

Keywords: auction, duration, optimization, forecasting, bidding, ordinal statistics, Poisson process.

Повне ім'я автора / Author's full name

Автор 1 / Author 1: Мельников Олег Станіславович, Melnikov Oleg Stanislavovich

A. M. KOPP, Doctor of Philosophy (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: andrii.kopp@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

D. L. ORLOVSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: dmytro.orlovskiy@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

O. M. OMKHOVYI, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of Information Systems and Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: aleksey.olhovoy@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6409-2706>

BLOCKCHAIN PLATFORM SELECTION AND SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DECENTRALIZED EXCHANGE OF BUSINESS PROCESS MODELS

Modern organizations employing the Business Process Management (BPM) approach typically handle collections of hundreds or even thousands of business process models. Business process modeling stands as the central technology within the entire BPM methodology. In line with the BPM lifecycle, these models visually represent current organizational activities that necessitate improvement using various diagramming notations. These graphical business process models can subsequently be employed to analyze ongoing activities in the enterprise, identifying potential drawbacks or "weak spots" that hinder the company's performance. Through business process models, organizations can modify the "virtual twins" of their organizational workflows, conduct simulations, and make informed decisions for business process improvement. Thus, business process models constitute the most valuable assets of the organization, conveying knowledge about ongoing activities and potentially encapsulating the best organizational or industry practices. The implementation of a centralized database for business process models can significantly benefit the entire organization, enhancing the efficiency of knowledge sharing and accumulation. However, centralized business process model repositories prove less efficient for inter-organizational knowledge exchange. Additionally, most business process models require significant person-hours for development and cannot be shared freely with competitors. The exchange of business process models should adhere to established mechanisms for managing valuable digital assets. Presently, Distributed Ledger Technologies (DLT), especially Blockchain, have gained enormous popularity. Therefore, we can employ the principles of Blockchain technology and the cryptocurrency industry to create software for the Decentralized Exchange (DEX) of business process models. This study explores the selection of a DLT platform and the development of software for the decentralized exchange of business process models, utilizing asset tokenization and smart contract technologies.

Keywords: blockchain platform selection, software development, decentralized exchange of business process models.

Introduction. The most of existing studies in the BPM and Blockchain interdisciplinary domain focus on business process (BP) execution enabled by smart contracts. For example, Corneli A. et al. [1] propose a framework for BP choreographies execution driven by the Blockchain tasks notarization. Another study by López-Pintado O. et al. [2] offers the Business Process Model and Notation (BPMN) execution engine named "Caterpillar" that serves for BP scenarios execution on the Ethereum Blockchain. The paper by Di Ciccio C. et al. [3] suggests the principles of inter-organizational BP execution using Blockchain technology. In paper [4] Mahgoub S. et al. propose an approach to Blockchain-driven BP modeling, execution, and monitoring. The most interesting paper by Tran A. B. et al. [5] proposes the "Lorikeet" tool that can create smart contracts from BPMN models to facilitate the execution of collaborative BPs. The object of this work is the DEX process of BP models in the cross-organizational environment. The subject of this work is the model of the DLT platform selection to implement the DEX workflow of BP models. The goal of this work is to simplify the DEX process and handle BP models using asset tokenization and smart contract technologies.

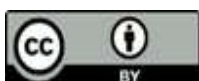
Motivation for the decentralized exchange of business process models implementation. DLT, or distributed ledger technology, functions as a digital platform for recording asset transactions, where information is simultaneously stored across multiple

locations. In contrast to conventional databases, distributed ledgers operate without a central data repository and administrative capabilities [6]. Each node within the distributed ledger independently processes and verifies all transactions, creating a comprehensive record and achieving consensus on their authenticity. This technology is versatile and can accommodate the storage of both static and dynamic data, including financial transactions [6]. An exemplar of DLT is the widely recognized Blockchain [6].

Blockchain technology represents a specific type of distributed ledger. In distributed ledgers, independent computers, known as nodes, play a crucial role in recording, sharing, and synchronizing transactions within their individual electronic ledgers, diverging from the centralized approach of traditional ledgers. Blockchain achieves this by organizing data into blocks, which are linked in an append-only manner [7]. Both Blockchain and DLT serve as the underlying infrastructure for the "internet of value", enabling the recording of interactions and the peer-to-peer transfer of "value" without the necessity of a centralized coordinating entity. In this context, "value" encompasses any record of asset ownership, ranging from currency and securities to land titles, as well as ownership of specific information like identification, health data, and other personal details [7].

Over the past few years, a significant number of companies have embraced various BPM (Business Process Management) strategies. These initiatives have manifested

© Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Olkhoviy O. M., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Common [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



in diverse forms, including directives for specific business units or departments to document work practices, and a broader organizational recognition of the imperative to align business processes with the overall financial and operational well-being. At one end of the spectrum, cubicle shelves are filled with numerous binders detailing specific work procedures, while at the other end, automated tools are employed to uphold and integrate business processes seamlessly into the daily execution of key applications. In instances where automated tools are utilized, they are often considered as essential assets for the organization [8].

The way an organization maintains information about its business processes (BPs) can signify whether they are perceived as mere optional documentation or genuine business assets. Typically, these documents serve as reference materials for the organization's daily operations. However, due to the nature of documentation, it tends to become outdated rapidly, posing challenges for monitoring and enforcement of adherence. The integration of these processes with the organization's automated technologies provides a mechanism to ensure timely updates and adherence [8].

A repository of business processes (BPs) acts as a centralized reference point to ensure consistent communication regarding the nature of each process, its application guidelines, the responsible parties for successful execution, a clear understanding of inputs or triggers, and the expected outcomes upon completion. This repository stores the necessary information for defining, analyzing, improving, and regulating business processes. It plays a crucial role in promoting awareness and acceptance of the cross-functional nature of many enterprise BPs, fostering collaboration across functional business units by facilitating and enforcing an end-to-end process-focused methodology [8]. The management of the business process (BP) repository is a critical aspect of BP management and should be regarded with the same level of seriousness as any other company asset. Serving as the organization's blueprint for process management, it not only establishes a common frame of reference and a method for consistent communication but also functions as the system of record for information related to process ownership, technological enablers, business rules, and both financial and operational controls. By promoting and acknowledging their cross-functional nature, the effective and consistent administration of this unique asset is essential for establishing and maintaining the holistic nature of the enterprise's processes [8]. As the size of an organization expands, there is a tendency to adopt a federated approach. Similarly, tools, designed to support the organization's strategic goals, often exhibit federated models [9].

Tokens within the Blockchain ecosystem serve as assets that facilitate the efficient and secure transfer, storage, and validation of information and value. These crypto tokens exhibit diverse forms and functionalities, with the capability to be programmed with unique qualities, expanding their range of applications. Categories such as security tokens, utility tokens, and cryptocurrencies have significant implications across various industries, contributing to enhanced liquidity, improved transaction

efficiency, and increased transparency and verifiability of assets [10].

Therefore, we suggest to explore the adoption of a decentralized business process (BP) model repository leveraging Blockchain and Distributed Ledger Technology (DLT). BP models are valuable knowledge assets that can be tokenized using Blockchain platforms, similar to other physical or virtual assets. Establishing such a repository could facilitate the exchange of BP models, representing best industry practices, among organizations implementing Business Process Management (BPM) strategies. This decentralized approach harnessing Blockchain and DLT technologies has the potential to enhance collaboration and knowledge sharing in the implementation of BPM strategies across different organizations.

Analysis of existing distributed ledger solutions for digital assets tokenization. Non-Fungible Tokens (NFTs) are currently making waves in the digital art and collectibles world, transforming the lives of digital artists with significant sales to a new crypto audience. Celebrities are also jumping on the bandwagon, finding a novel way to connect with their fan base. However, NFTs can symbolize ownership for any unique asset, whether digital or physical, functioning much like a deed for a property [11].

Currently, Ethereum stands as the most widely adopted Blockchain for establishing NFT marketplaces. Leading NFT platforms like "Rarible", "OpenSea", "SuperRare", and "Decentraland" leverage the Ethereum network. Creating NFTs on the Ethereum Virtual Machine (EVM) is notably straightforward for beginners; often, it involves uploading a file and providing some basic information. Resolving ownership concerns is also simplified due to the easily traceable transaction history and metadata. The use of popular token standards such as ERC-721 and ERC-1155 further enhances interoperability, streamlining the overall development process [12].

Ethereum is organized in layers, each providing essential support for the one above it (Fig. 1). These layers come with their tools to navigate and respond to market dynamics within the Ethereum economy [13]. The architecture includes the Ethereum Blockchain platform layer for ETH staking, the application layer for activities like savings and DeFi applications, and the user aggregation layer for liquidity providers [13].

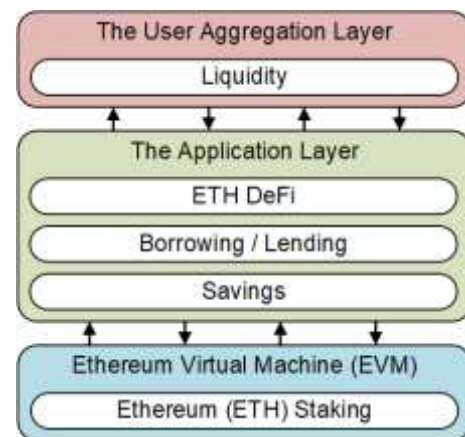


Fig. 1. The digital ecosystem of the Ethereum platform

Binance, recognized as the world’s largest cryptocurrency exchange, unveiled plans to launch the Binance NFT marketplace in June 2021. This platform is designed to facilitate cost-effective communication between NFT buyers and sellers, leveraging Binance’s substantial liquidity reserves [12]. Not only does the platform prioritize scalability and affordability, but it also boasts compatibility with Ethereum, ensuring interoperability. Additionally, numerous NFT marketplaces like “BakerySwap”, “Battle Pets”, “PancakeSwap”, among others, are actively operating on the Binance Blockchain [12]. Fig. 2 below illustrates the digital ecosystem of the Binance Smart Chain (BSC) platform [14].

Certainly, the BSC platform offers solutions for

NFT standard for Cardano is under development by NFT-DAO (Decentralized Autonomous Organization), and projects like “Cardano Kidz” have already sold out despite the absence of real-world services. Additionally, initiatives such as “Professor Cardano”, “LoveAda”, and “Somint” are actively working on establishing an NFT marketplace on the Cardano Blockchain [12].

The digital ecosystem of the Cardano platform is depicted in Fig. 3 below [15].

Cardano, as shown in Fig. 3, provides solutions for token management, NFTs, utilities, and DeFi [15].

TRUESY, an NFT marketplace on the Tezos Blockchain, prioritizes minimizing its carbon footprint. The platform asserts that it uses 2 million units less energy

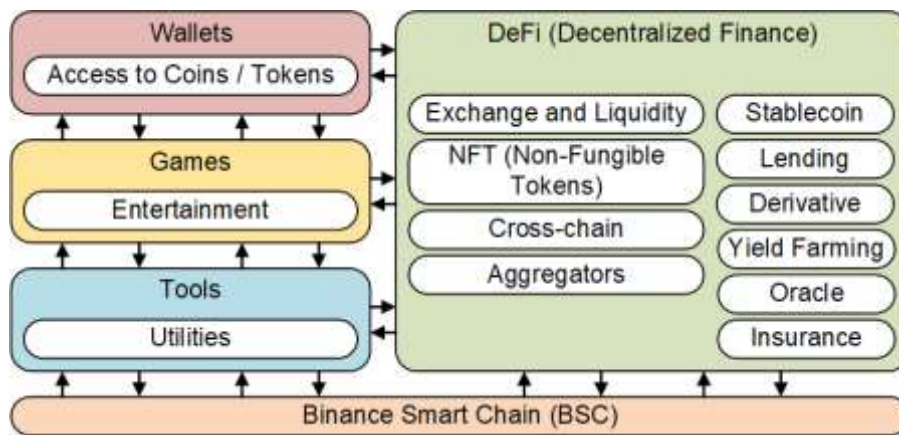


Fig. 2. The digital ecosystem of the BSC platform

cryptocurrency wallet management, decentralized gaming, cryptocurrency tools, and DeFi, as illustrated in Fig. 2 [14].

The Cardano Blockchain currently does not support smart contracts, but it does support NFTs. Users need to trust projects before they are fully launched in the platform’s ICO-like (Initial Coin Offering) concept. The

than rival NFT platforms by optimizing computing performance utilization. Another Tezos-based NFT marketplace, “Hic et Nunc”, also emphasizes environmental conservation by reducing energy consumption. “OneOf” is a new platform presenting itself as an ESG-friendly (Environmental, Social, and Corporate

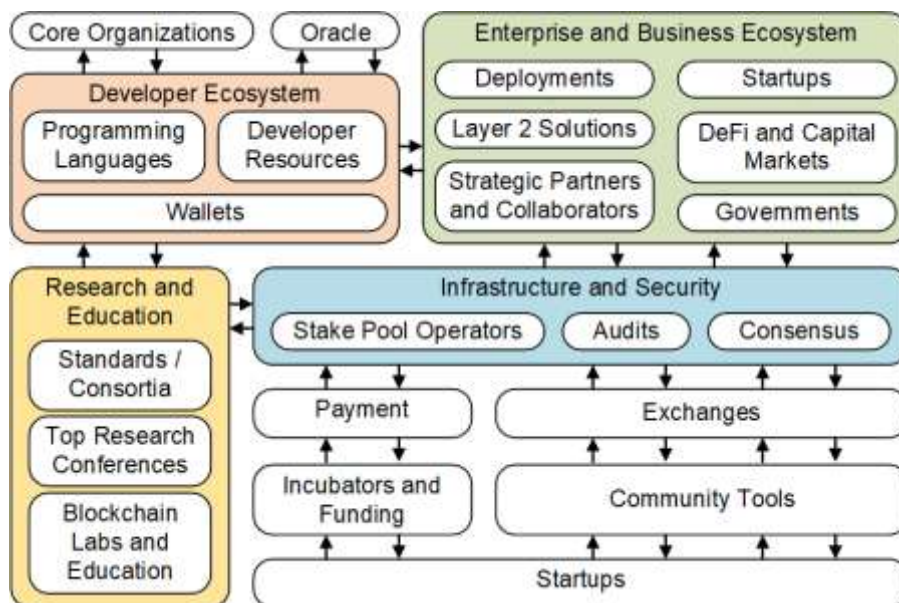


Fig. 3. The digital ecosystem of the Cardano platform

Governance) NFT marketplace, offering affordable NFTs for environmentally conscious music enthusiasts [12].

The Tezos platform offers cryptocurrency tools, DeFi, and NFT applications [16].

The digital ecosystem of the Tezos platform is illustrated in Fig. 4 below [16].

Despite the presence of competitors like BSC and

Blockchain, gain a lot of interest. As a result, we may recommend the deployment of software components to support the DEX process of BP models based on the principles of Blockchain technology and cryptocurrency industry.

However, the Blockchain platform should be selected among the ones used for NFT token minting. The list of



Fig. 4. The digital ecosystem of the Tezos platform

Cardano, a review of current distributed ledger systems highlights the maturity and leadership of the Ethereum platform. Its standing as a promising Blockchain solution is reinforced with the release of Ethereum 2.0. Additionally, the compatibility of Ethereum’s programming with BSC means that transitioning from one major platform to another requires no additional software customization.

However, the challenge of choosing among existing Blockchain smart contract execution platforms persists, especially with the continual improvement and growing popularity of other platforms like Solana, Algorand, and others [12].

Formal problem statement. A unified database of BP models can significantly enhance knowledge sharing and accumulation throughout the entire organization, improving efficiency. However, centralized BP model repositories prove inefficient for inter-organizational information exchange. Additionally, many BP models require extensive person-hours for development and cannot be freely shared with competitors.

The exchange of BP models should be based on established methods for managing critical digital assets. Nowadays, Distributed Ledger Technologies, especially

candidate Blockchain networks includes already given in the previous section, as well as two more popular Blockchain platforms – Solana and Algorand [12].

According to the practitioners’ guide [17], the most important aspects to consider when choosing the NFT Blockchain Platform (NFT-BP, P) are:

- Transaction Speed (TS);
- Transaction Cost (TC);
- Smart Contract Functionality (SCF);
- Consensus Mechanism (CM).

Therefore, for each of the considered aspects (1 – 4), respective ranks can be calculated:

- TS Rank (TS_R);
- TC Rank (TC_R);
- SCF Rank (SCF_R);
- CM Rank (CM_R).

The meta-model of NFT-BPs and their respective aspect ranks is given in Fig. 5 below.

Thus, we can formally describe the problem of the DLT platform selection to implement the DEX of BP models as follows:

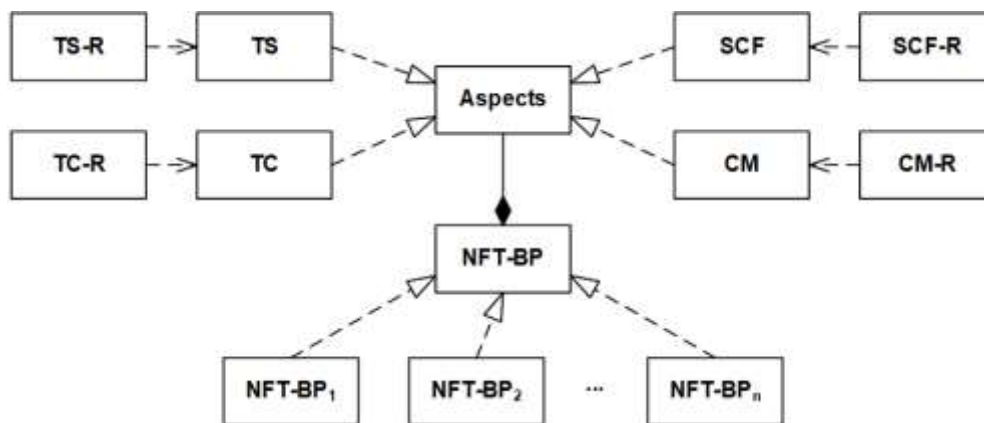


Fig. 5. The meta-model of NFT-BPs and their aspect ranks

$$\begin{aligned}
 TS_R(P) + SCF_R(P) + CM_R(P) &\rightarrow \max, \\
 TC_R(P) &\rightarrow \min, \\
 P &\in \{P_i, i = \overline{1, n}\},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$TS_R(P_i) = \frac{1}{TS_{\max}} TS(P_i),
 \tag{3}$$

where n is the number of considered NFT-BPs for the selection.

Selection of the blockchain platform for the decentralized exchange of business process models. Table 1 below contains the metrics of considered blockchain platforms for NFT-based BP model collection deployment [17].

where TS_{\max} is the maximum TS among all of the considered NFT-BPs:

$$TS_{\max} = \max_{i=1, n} \{TS(P_i)\}.
 \tag{4}$$

While the TC-R can be calculated using the reversed scaling:

Table 1 – Considered aspects and metrics of studied NFT-BPs

Aspect	Ethereum	BSC	Cardano	Tezos	Solana	Algorand
TS, TPS	15	60	250	40	2500	1200
TC, USD	7	3	0.02	0.1	0.00025	0.00022
SCF, smart contract programming language	Solidity, Vyper	Solidity, Vyper	Haskell, Plutus, Marlowe	SmartPy, LIGO	Rust, C, C++	TEAL, Python
CM, consensus algorithm	PoS	PoSA	PoS	LPoS	PoH + PoS	PPoS

Since the smart contract development language and consensus algorithm are given as linguistic variables and are not as much critical as transaction speed and cost, let us reduce the initial model and propose the relaxed problem of the DLT platform selection:

$$\begin{aligned}
 TS_R(P) &\rightarrow \max, \\
 TC_R(P) &\rightarrow \min, \\
 P &\in \{P_i, i = \overline{1, n}\}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

The TS and TC aspect's metrics are proposed to be scaled in the [0,1] range.

Hence, the TS-R can be calculated using the following direct scaling:

$$TC_R(P_i) = 1 - \frac{1}{TC_{\max}} TC(P_i),
 \tag{5}$$

where TC_{\max} is the maximum TC among all of the considered NFT-BPs:

$$TC_{\max} = \max_{i=1, n} \{TC(P_i)\}.
 \tag{6}$$

The corresponding TS-R and TC-R values obtained using equations (3) – (6) are demonstrated in Table 2 below.

Fig. 6 represents the map of NFT-BPs placed in the Euclidean plane using the calculated ranks (Table 2).

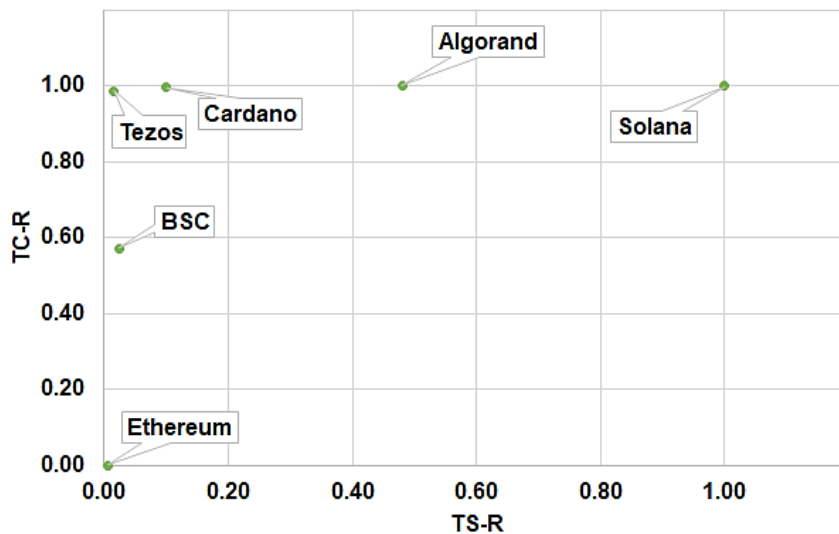


Fig. 6. The map of NFT Blockchain platforms in the Euclidean plane

Table 2 – Ranks of studied NFT-BPs

Aspect's Rank	Ethereum	BSC	Cardano	Tezos	Solana	Algorand
TS-R	0.00600	0.02400	0.10000	0.01600	1.00000	0.48000
TC-R	0.00000	0.57143	0.99714	0.98571	0.99996	0.99997

Therefore, the “best” Blockchain platform in terms of TS and TC metrics then can be found using the following equation based on the Maximin principle [18]:

$$P^* = \arg \max_{i=1, \dots, n} \{ \min \{ TS(P_i), TC(P_i) \} \}, \quad (7)$$

where P^* is the Blockchain platform selected as the “best” to implement the DEX workflow of BP models.

The obtained results are demonstrated in Fig. 7 below.

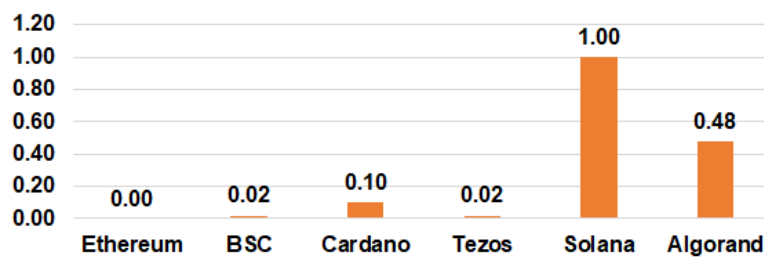


Fig. 7. Ranks of evaluated NFT Blockchain platforms calculated using the Maximin principle

According to Fig. 7, Solana is the best DLT platform for minting NFT collections of business process models.

Development of the blockchain platform for the decentralized exchange of business process models. To perform the experiments, the following software solution was created for minting NFT collections of business

process models. Its UML (Unified Modeling Language) deployment diagram is demonstrated in Fig. 8 below.

According to Fig. 8, the software for minting NFT collections of business process models has the client-server architecture. The server side (back-end) is implemented using the NodeJS platform and the JavaScript programming language. The application uses third-party library XML2JS [19] for processing BPMN 2.0 files given as specially-structured XML (eXtensible Markup

Language) documents. The server application consists of two major components:

- “Endpoint” – for HTTP (HyperText Transfer Protocol) requests processing and responses generation when interacting with the client side (front-end);

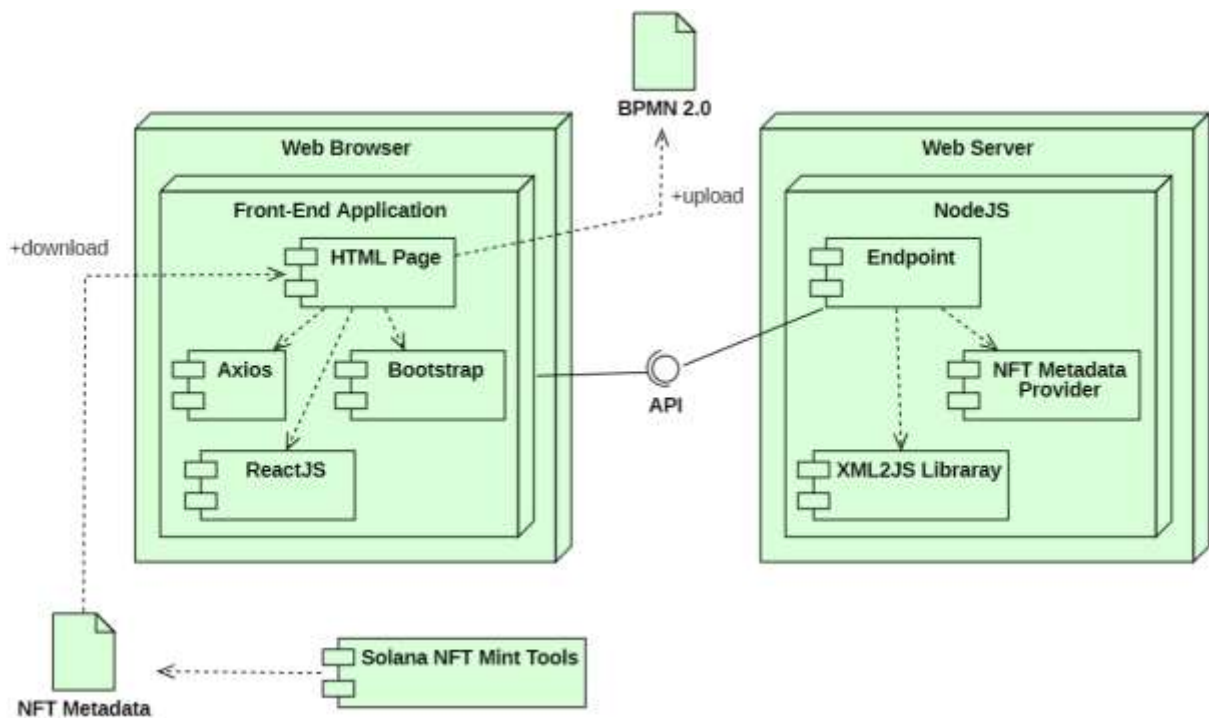


Fig. 8. The structure of developed software solution for minting NFT collections of business process models

- “NFT Metadata Provider” – for generating Solana-based NFT metadata files in the JSON (JavaScript Object Notation) for further deployment into the Blockchain network.

The client side (front-end) is implemented using HTML (Hyper Text Markup Language) and JavaScript. Third-party components are CSS (Cascading Style Sheets) framework Bootstrap [20] for web-pages design, Axios for HTTP requests and responses handling [21], and ReactJS for dynamic web pages rendering [22].

This software solution allows users to process BPMN 2.0 files and generate NFT metadata, which is further can be deployed to the Solana platform (i.e. the “Solana NFT Mint Tools” component in Fig. 8). The Metaplex protocol [23] is used to build NFT collections.

In general, the workflow of minting the NFT collection based on BPMN business process models includes the following steps:

- the author of business process models uploads corresponding BPMN 2.0 files;
- the data extracted from BPMN 2.0 files is sent to the server where NFT metadata is generated;
- the generated NFT metadata is sent to the client and displayed in the user interface;
- the author of business process models downloads NFT metadata and images;
- the author of business process models uses Metaplex to create the NFT collection (using generated

NFT metadata and images) on the Solana Blockchain platform;

- the author of business process models now can use the created NFT collection.

Let us demonstrate the sample BPMN 2.0 model, which describes the travel booking business process of a travel agency. Its diagram is illustrated in Fig. 9 below.

According to Fig. 9, this business process is described using:

- 7 tasks;
- 1 start event and 3 end events;
- 3 XOR (exclusive logic) and 1 event-based (also exclusive logic) gateways;
- 15 nodes in total;
- 15 sequence flows.

The home page of the created software for minting NFT collections using BPMN business process models is demonstrated in Fig. 10 below.

This web page illustrates the tokenized travel booking business process model (Fig. 9) with downloadable NFT metadata and image.

Experimental results and discussion. Table 3 below demonstrates approximate costs in native Blockchain network tokens and USD required to create NFTs on different Blockchain platforms [24].

Table 3 – Cost of creating NFTs on different Blockchain platforms

Blockchain Platform	Cost of creating NFT (native network tokens)	Cost of creating NFT (USD)
Ethereum	0.00252 ETH	2.90000
BSC	0.00500 BNB	1.24000
Cardano	1.50000 ADA	0.39000
Tezos	1.00000 XTZ	0.82000 (for an entire collection)
Solana	0.00045 SOL	0.00810
Algorand	0.00100 ALGO	0.00018

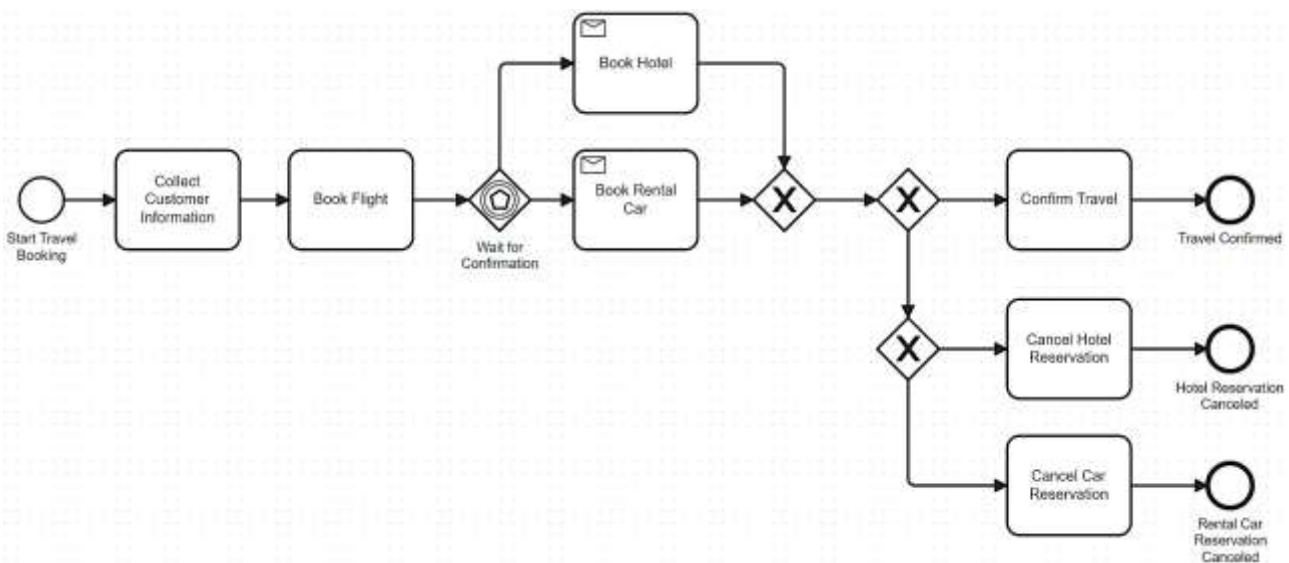


Fig. 9. The travel booking BPMN business process model of a travel agency

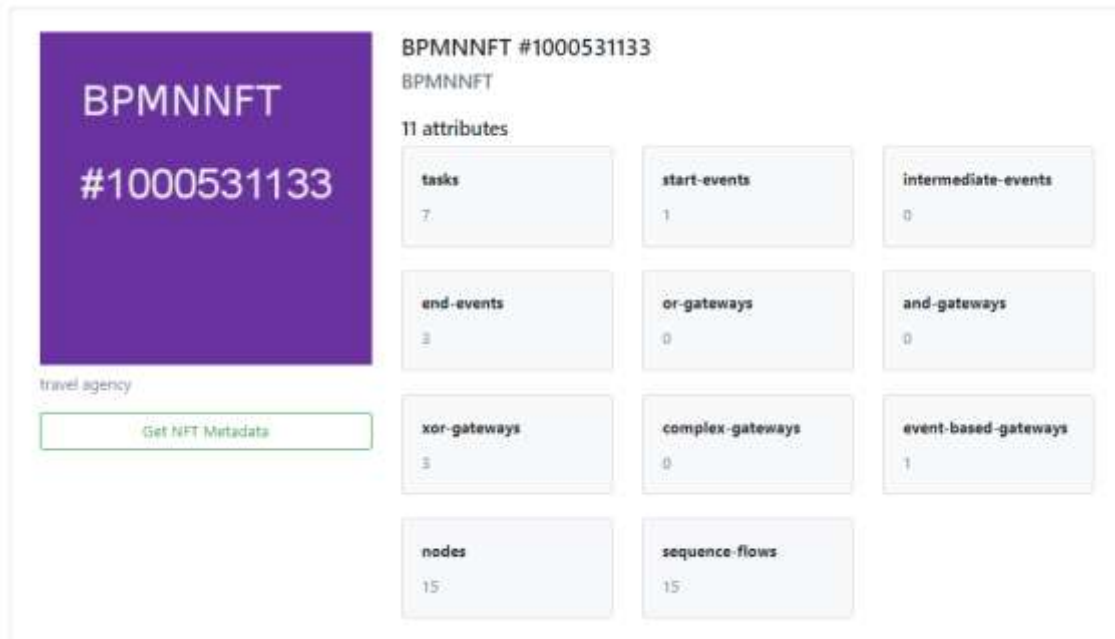


Fig. 10. The home page of developed software solution for minting NFT collections of business process models

The experiments were performed using BPMN models of the BPMNI (Business Process Management Academic Initiative) collection [25]. It includes 18812 business process models. Therefore, the following results were obtained to define the TC-R, TS-R, and total Ranks of the compared blockchain platforms (Table 4).

According to results in Table 4, Solana demonstrates the best deployment time, while Algorand demonstrates the best deployment cost.

The Maximin principle [18] (6) demonstrates the equal ranks of these Blockchain platforms, as well as the comparison to their competitors (Fig. 11).

Table 4 demonstrates that Solana outperforms Algorand by the total time (seconds) in $15.68 / 7.52 \approx 2$ times only, while Algorand outperforms Solana by the total cost (USD) in $152.38 / 3.39 \approx 45$ times. Therefore, Algorand could be considered as the alternative to Solana for minting NFT collections of business process models. Nevertheless, Solana is the second largest DLT platform for NFT (after Ethereum) with the unique consensus mechanism (PoH + PoS) capable of handling approximately 2500 TPS [17]. Powerful NFT ecosystem and community, relatively easy development and a low entry threshold make Solana still a reasonable choice for

Table 4 – Evaluation results of minting the collection of NFTs on different Blockchain platforms

Blockchain Platform	Total cost, USD	Total time, Seconds	TC-R	TS-R	Rank
Ethereum	54554.80	1254.13	0.00	0.00	0.00
BSC	23326.88	313.53	0.57	0.75	0.57
Cardano	7336.68	75.25	0.87	0.94	0.87
Tezos	0.82	470.30	1.00	0.63	0.63
Solana	152.38	7.52	1.00	0.99	0.99
Algorand	3.39	15.68	1.00	0.99	0.99

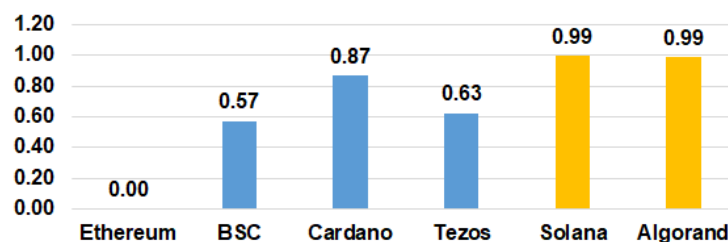


Fig. 11. The comparison of Blockchain platform evaluation results for minting the collection of 18812 NFTs

the tokenization of such digital assets as business process models for decentralized exchange.

Conclusions. Enterprises implementing BPM strategies commonly manage extensive collections of BP models, often numbering in the hundreds or thousands. Central to the BPM methodology is BP modeling, a key technology that involves visually representing current organizational processes in need of change using various diagramming notations, as per the BPM lifecycle.

The exchange of BP models should follow existing procedures for managing crucial digital assets. Currently, DLTs, especially Blockchain, are gaining significant traction. As a result, in this study we proposed the model of the DLT platform selection to implement the DEX workflow of BP models based on the principles of Blockchain technology and cryptocurrency industry.

Therefore, to streamline the DEX process of BP models using asset tokenization and smart contract technologies, this study has addressed the following tasks:

- the state-of-the-art is reviewed, and the research object, subject, and goal are defined;
- the motivation for the implementation of the decentralized exchange of business process models is outlined;
- the analysis of existing distributed ledger solutions suitable for digital access tokenization is made;
- the formal problem statement is made using the multi-objective choice model, which is proposed to be solved using the Maximin principle [18] due to the risk and uncertainty involved in the Blockchain and NFT field, while the tradeoff between the transaction speed and cost objectives is eliminated by reversing transaction cost rank values (5);
- the blockchain platform for the decentralized exchange of business process models is selected – Solana is identified as the best solution for NFT deployment by transaction speed and cost criteria;
- the software solution for minting NFT collections of business process models is developed – it takes BPMN models and products JSON-based NFT metadata for further deployment in the Solana network;
- experiments are performed and respective results are obtained – even though Algorand may outperform Solana in the transaction cost, Solana is still a reasonable choice for minting NFT collections of business process models.

References

1. Cornel A. et al. *A Smart Contract-based BPMN Choreography Execution for Management of Construction Processes*. URL: <http://dx.doi.org/10.22260/ISARC2021/0118> (access date: 20.10.2023).
2. López-Pintado O. et al. *Caterpillar: a business process execution engine on the Ethereum blockchain*. URL: <https://arxiv.org/abs/1808.03517> (access date: 20.10.2023).
3. Di Ciccio C. et al. *Blockchain support for collaborative business processes*. URL: <https://doi.org/10.1007/s00287-019-01178-x> (access date: 20.10.2023).
4. Mahgoub S. *A novel framework for blockchain enabled business process*. URL: https://www.iraseat.com/wp-content/Data/JIC/V001_I01_A01_JIC-20-003.pdf (access date: 21.10.2023).

5. Tran A. B., Lu Q., Weber I. *Lorikeet: A Model-Driven Engineering Tool for Blockchain-Based Business Process Execution and Asset Management*. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2196/BPM_2018_paper_12.pdf (access date: 21.10.2023).
6. *Distributed ledger technology (DLT)*. URL: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/distributed-ledger> (access date: 25.10.2023).
7. *Blockchain & Distributed Ledger Technology (DLT)*. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/financialsector/brief/blockchain-dlt> (access date: 28.10.2023).
8. *The Value of a Formal Business Process Repository*. URL: <https://www.bpminstitute.org/resources/articles/value-formal-business-process-repository> (access date: 07.11.2023).
9. *What Is the Best Practice Model for BPM Programs?* URL: <https://www.apqc.org/blog/what-best-practice-model-bpm-programs> (access date: 12.11.2023).
10. *What Is Tokenization in Blockchain?* URL: <https://www.gemini.com/cryptopedia/what-is-tokenization-definition-crypto-token> (access date: 17.11.2023).
11. *Non-fungible tokens (NFT)*. URL: <https://ethereum.org/en/nft/> (access date: 17.11.2023).
12. *How to choose the best blockchain for NFT marketplace development?* URL: <https://www.ulam.io/blog/how-to-choose-the-best-blockchain-for-nft-marketplace-development/> (access date: 24.11.2023).
13. *Ethereum: The Digital Finance Stack*. URL: <https://medium.com/pov-crypto/ethereum-the-digital-finance-stack-4ba988c6c14b> (access date: 25.10.2023).
14. *What is Binance Smart Chain? Investment opportunities and ways to make money with BSC*. URL: <https://coinlive.me/what-is-binance-smart-chain-investment-opportunities-and-ways-to-make-money-with-bsc-4463.html> (access date: 25.10.2023).
15. *Cardano Ecosystem*. URL: <https://adavault.com/index.php/2021/03/26/cardano-ecosystem/> (access date: 25.10.2023).
16. *Tezos Ecosystem Map v2*. URL: <https://imgur.com/zj4NyZh> (access date: 25.10.2023).
17. *Which Blockchain to Choose for Your NFT Project?* URL: <https://pixelplex.io/blog/top-ten-blockchains-for-nft-development/> (access date: 25.10.2023).
18. ten Have H. *Maximin Principle*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54161-3_345 (access date: 29.11.2023).
19. *Xml2js*. URL: <https://www.npmjs.com/package/xml2js> (access date: 29.11.2023).
20. *Bootstrap*. URL: <https://getbootstrap.com/> (access date: 29.11.2023).
21. *Axios Docs*. URL: <https://axios-htp.com/docs/intro> (access date: 29.11.2023).
22. *React*. URL: <https://react.dev/> (access date: 29.11.2023).
23. *Token Metadata Standard (Version 1.0)*. URL: <https://docs.metaplex.com/programs/token-metadata/changelog/v1.0> (access date: 29.11.2023).
24. *How Much Does It Cost to Mint an NFT?* URL: <https://www.ulam.io/blog/cost-of-minting-nfts-on-different-blockchains-and-how-to-reduce-them> (access date: 29.11.2023).
25. *Model Collection of the Business Process Management Academic Initiative*. URL: <https://zenodo.org/record/3758705#.ZFtSIHZBxPY> (access date: 30.11.2023).

References (transliterated)

1. Cornel A. et al. *A Smart Contract-based BPMN Choreography Execution for Management of Construction Processes*. Available at: <http://dx.doi.org/10.22260/ISARC2021/0118> (accessed 20.11.2023).
2. López-Pintado O. et al. *Caterpillar: a business process execution engine on the Ethereum blockchain*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1808.03517> (accessed 20.10.2023).
3. Di Ciccio C. et al. *Blockchain support for collaborative business processes*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00287-019-01178-x> (accessed 20.10.2023).
4. Mahgoub S. *A novel framework for blockchain enabled business process*. Available at: https://www.iraseat.com/wp-content/Data/JIC/V001_I01_A01_JIC-20-003.pdf (accessed 21.10.2023).
5. Tran A. B., Lu Q., Weber I. *Lorikeet: A Model-Driven Engineering Tool for Blockchain-Based Business Process Execution and Asset*

- Management. Available at: https://eur-ws.org/Vol-2196/BPM_2018_paper_12.pdf (accessed 21.10.2023).
6. *Distributed ledger technology (DLT)*. Available at: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/distributed-ledger> (accessed 25.10.2023).
 7. *Blockchain & Distributed Ledger Technology (DLT)*. Available at: <https://www.worldbank.org/en/topic/financialsector/brief/blockchain-dlt> (accessed 28.10.2023).
 8. *The Value of a Formal Business Process Repository*. Available at: <https://www.bpminstitute.org/resources/articles/value-formal-business-process-repository> (accessed 07.11.2023).
 9. *What Is the Best Practice Model for BPM Programs?* Available at: <https://www.apqc.org/blog/what-best-practice-model-bpm-programs> (accessed 12.11.2023).
 10. *What Is Tokenization in Blockchain?* Available at: <https://www.gemini.com/cryptopedia/what-is-tokenization-definition-crypto-token> (accessed 17.11.2023).
 11. *Non-fungible tokens (NFT)*. Available at: <https://ethereum.org/en/nft/> (accessed 17.11.2023).
 12. *How to choose the best blockchain for NFT marketplace development?* Available at: <https://www.ulam.io/blog/how-to-choose-the-best-blockchain-for-nft-marketplace-development/> (accessed 24.11.2023).
 13. *Ethereum: The Digital Finance Stack*. Available at: <https://medium.com/pov-crypto/ethereum-the-digital-finance-stack-4ba988c6c14b> (accessed 25.12.2023).
 14. *What is Binance Smart Chain? Investment opportunities and ways to make money with BSC*. Available at: <https://coinlive.me/what-is-binance-smart-chain-investment-opportunities-and-ways-to-make-money-with-bsc-4463.html> (accessed 25.10.2023).
 15. *Cardano Ecosystem*. Available at: <https://adavault.com/index.php/2021/03/26/cardano-ecosystem/> (accessed 25.10.2023).
 16. *Tezos Ecosystem Map v2*. Available at: <https://imgur.com/zj4NyZh> (accessed 25.10.2023).
 17. *Which Blockchain to Choose for Your NFT Project?* Available at: <https://pixelplex.io/blog/top-ten-blockchains-for-nft-development/> (accessed 25.10.2023).
 18. *ten Have H. Maximin Principle*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54161-3_345 (accessed 29.11.2023).
 19. *Xml2js*. Available at: <https://www.npmjs.com/package/xml2js> (accessed 29.11.2023).
 20. *Bootstrap*. Available at: <https://getbootstrap.com/> (accessed 29.11.2023).
 21. *Axios Docs*. Available at: <https://axios-http.com/docs/intro> (accessed 29.11.2023).
 22. *React*. Available at: <https://react.dev/> (accessed 29.11.2023).
 23. *Token Metadata Standard (Version 1.0)*. Available at: <https://docs.metaplex.com/programs/token-metadata/changelog/v1.0> (accessed 29.11.2023).
 24. *How Much Does It Cost to Mint an NFT? Available at: https://www.ulam.io/blog/cost-of-minting-nfts-on-different-blockchains-and-how-to-reduce-them* (accessed 29.11.2023).
 25. *Model Collection of the Business Process Management Academic Initiative*. Available at: <https://zenodo.org/record/3758705#.ZFtSIH2BxPY> (accessed 30.11.2023).

Received 04.12.2023

УДК 004.4

А. М. КОПП, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: andrii.kopp@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: dmytro.orlovskiy@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

О. М. ОЛЬХОВИЙ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій, м. Харків, Україна, e-mail: aleksey.olhovoy@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6409-2706>

ВИБІР БЛОКЧЕЙН-ПЛАТФОРМИ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОБМІНУ МОДЕЛЯМИ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

Сучасні організації, які практикують концепцію процесного управління Business Process Management (BPM), як правило, мають справу з наборами сотень або навіть тисяч моделей бізнес-процесів. Моделювання бізнес-процесів – це ключова технологія у всій методології BPM. Відповідно до життєвого циклу управління бізнес-процесами, моделі бізнес-процесів використовуються для візуального представлення поточної організаційної діяльності, яка потребує удосконалення, за допомогою різних графічних нотацій. Ці графічні моделі бізнес-процесів можуть в подальшому використовуватись для аналізу поточної діяльності підприємства для визначення можливих недоліків або «слабких місць», що знижують продуктивність компанії. За допомогою моделей бізнес-процесів організації можуть вносити зміни до «віртуальних двійників» організаційних процесів, здійснювати імітаційне моделювання та прімати рішення щодо вдосконалення бізнес-процесів. Таким чином, моделі бізнес-процесів є найбільш цінними організаційними активами, оскільки вони передають знання про поточну діяльність та можуть містити найкращі організаційні або галузеві практики. Наявність централізованої бази даних моделей бізнес-процесів може стати корисним для всієї організації – розповсюдження та накопичення знань стане значно ефективнішим. Проте, централізовані репозиторії моделей бізнес-процесів не дуже ефективні для міжорганізаційного обміну знаннями. Крім того, на більшість моделей бізнес-процесів було витрачено сотні людино-годин і вони не можуть бути розповсюджені серед конкурентів на безкоштовній основі. Обмін моделями бізнес-процесів має базуватись на вже відомих механізмах управління цінними цифровими активами. Наразі технології розподіленого реєстру (DLT – Distributed Ledger Technologies), особливо блокчейн, стали наймовірніо популярними. Таким чином, пропонується застосувати принципи технологій блокчейн та криптовалютної сфери для розробки програмного забезпечення для децентралізованого обміну (DEX – Decentralized Exchange) моделями бізнес-процесів. У цьому дослідженні розглядається вибір DLT-платформи та розробка програмного забезпечення для децентралізованого обміну моделями бізнес-процесів з використанням технологій токенизації активів та смарт-контрактів.

Ключові слова: вибір блокчейн-платформи, розробка програмного забезпечення, децентралізований обмін моделями бізнес-процесів.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Копп Андрій Михайлович, Kopp Andrii Mykhailovych

Автор 2 / Author 2: Орловський Дмитро Леонідович, Orlovskiy Dmytro Leonidovych

Автор 3 / Author 3: Ольховий Олексій Михайлович, Olkhovyi Oleksii Mykhailovych

V. V. YAMBURENKO, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Student, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yamburenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4797-8684>

I. V. LIUTENKO, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: cherliv68@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1825>

A. M. KOPP, Doctor of Philosophy (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kopp93@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

D. M. HOLOVNIYA, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Student, Kharkiv, Ukraine, e-mail: dimagolovnya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0901-025X>

ALGORITHM AND SOFTWARE OF MEDICAL PERSONNEL SELECTION SYSTEM

There is a lot of routine work in any organization, including in recruitment agencies. Effective management organization and automation of activities of employees of recruiting agencies is not an easy task. The system should automate the routine actions of workers of recruiting agencies and be convenient for their clients. This paper proposes an approach to automating the selection of necessary medical staff. Not all information systems used by recruiting agencies can compare candidates and generate results that include several of the best candidates. Based on the analysis of the subject area, groups of parameters that significantly affect the choice of medical personnel were determined. The proposed approach is to analyze the request from the client, and then in the system find requests of other clients similar to it in terms of parameters, for which a candidate has already been found. The next step is to take the profiles of healthcare professionals that have been suggested for these requests (they act as benchmarks) to further compare them with existing candidates. Each employee profile parameter has its own similarity function. Available candidates will receive scores and will be ranked. We also additionally adjust the assessment by comparing candidates with the current request. Software was developed to automate the selection of medical personnel. For its implementation, a three-level client-server architecture is proposed. MVC (Model View Controller) architecture was chosen for the server part. The Single Page Application architectural template is used for the client part. The server part is divided into three layers, which further demarcate and structure the responsibilities of the system components. .NET technologies are used to implement business logic. SQL Server is used for the server and database provider. The use of the software implementation of the developed system demonstrated quite good results. The average time for selecting the 10 best candidates out of 500 is 0.4 seconds, and the processing of only 1 resume by a person takes several minutes.

Keywords: personnel selection, automation, data processing, algorithm, software, system architecture, development technologies.

Introduction. In the era of information overload, people use a variety of strategies to make many decisions: what product and service to choose, how to spend your free time, what movie to watch, who to meet, where to repair your car, or which candidate is more suitable for a particular job. To speed up decision-making and simplify the process, information systems that automate some of these strategies come to the rescue in order to provide individual, accessible and high-quality recommendations for further choices. The use of information systems in the field of medical personnel selection can be extremely relevant for several reasons.

First, medical personnel play a crucial role in providing quality medical care, so it is important to find the most competent specialists to work in medical facilities. These systems can analyze volumes of data about potential candidates, take into account their skills, education, work experience, as well as specialization and other factors that influence successful performance in the medical environment.

Second, information can effectively reduce the time spent by recruiters on searching for and evaluating candidates, which increases productivity and lowers costs for the recruitment process. In addition, such systems can provide a more objective approach to candidate selection, as they are based on data analysis rather than subjective assessments.

The purpose of the work is the development of algorithmic and software for the task of automation of

personnel selection in the field of medicine. This will improve the quality of the selection of doctors and reduce the amount of time needed to find the right specialist.

Analysis of recent research and publications. Recommendation systems are very often used to solve selection problems [1]. The field of data analysis is constantly developing and improving, and the direction of recommender systems is one of the most promising in it. Today, we can find a huge number of examples of the use of recommender systems in many areas of our life [2], [3]. As the simplest example, in advertising, for different users, the ad is always tailored to them. Popular services, such as Google Ads, Yahoo Gemini, Microsoft Advertising, create hidden profiles for users, and use them to personalize the search results and add personal advertising positions to it. The same approach is used in popular social networks such as Twitter, Facebook, and Instagram, where we see personalized advertising between posts.

The first commercially available recommendation system was developed by Amazon and was called Recommendations for You. This system was implemented in 1998 [4]. The goal was to improve the personal experience of customers and increase sales. The PC analyzed each user's purchases and product views, and then recommended other products they might like based on that information.

Technically, recommender systems have a lot in common with forecasting theory, information retrieval systems, approximation theory and the science of

© Yamburenko V. V., Liutenko I. V., Kopp A. M., Holovnia D. M., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Common [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



management and modeling of consumer choice, but modern recommender systems are considered as an independent scientific field. The main task of the recommender system is to determine ratings for objects, which can be goods and services or even other users, which are not yet known to a specific user or consumer [5]. These ratings are based on information about the customer's previous transactions or other characteristics related to his preferences, actions or personal information [6]. The system analyzes the data, assigns a rating to the objects and chooses those with the highest ratings to offer them to the user [7].

In the medical field, recommendation systems are used in several directions. The first is decision-making, when it is necessary to analyze a certain case and make a certain decision related to treatment. The second is the selection of medical personnel, when the patient is looking for, for example, a good family doctor and the system tries to recommend someone to him. Or when a certain organization, such as a rehabilitation center or a home for the elderly, is looking for a certain specialist with the necessary skills to solve certain tasks (providing therapies, care). Usually, such organizations turn to certain recruiting centers that search for and select potential candidates. Such recruiting centers can use recommender systems for an optimal and quick search for specialists to close a specific request.

HealthNetsocial [8] is an Italian social network in alpha testing. This network connects patients with similar health situations. This system helps find solutions to health problems through recommendations from doctors or medical organizations that best match the user's profile. The key part of the system is the recommender system, which suggests other patients who are most similar to the user and helps with the choice of a doctor or hospital according to the state of health. Their algorithm first calculates the similarity between patient profiles. And then it generates a ranked list of doctors or medical institutions that best match the patient's profile. In addition, data on health conditions and previous cases of other patients are also taken into account to clarify the results [5].

The University of California and the Nova School of Business and Economics have jointly developed a prototype algorithm [9] that helps match primary care physicians to patients. This research was sponsored by grants from Amazon and Microsoft. For their study, they used a large dataset from a private European provider of health advice. Which contained 1.07 million records of consultations between 380 thousand patients and 314 doctors in 16 hospitals for the period 2012-2017. As a method of solving the generation problem, they used the method of collaborative filtering. Their task was to generate a rating of patients' trust in doctors, that is, as a result, the user will receive a list of doctors whom he is likely to trust the most [6].

In 2019, the article "An adaptive doctor-recommender system" was published, which considers the research process of the problem of generating recommendations for the selection of doctors [10]. The study was conducted by several universities in Pakistan (NUML, IIU UET). A hybrid recommendation system was proposed and

implemented, combining content, collaborative and demographic filtering approaches for efficient generation of a doctor's recommendation. The proposed system solves the problem by analyzing the patient's interest in choosing a doctor. And also uses a relatively new adaptive algorithm for generating the rating of doctors. Moreover, the rating function converts patients' criteria for choosing doctors into a numerical value that will be used in the rating of doctors. The main feature of the system is the use of an analytically hierarchical model, which was presented by Thomas Saati.

Formulation of the problem. In general, the use of information systems in the field of medical personnel selection can improve the quality of recruitment, ensure the optimal distribution of staff and contribute to the growth of the efficiency of medical institutions. We need to develop software that, based on certain information and characteristics of medical professionals and information about users looking for a specific specialist, will be able to provide quality recommendations for the selection of medical professionals.

The following information about the needs and requirements of the user (details of specialization, personal characteristics, information about experience) should be submitted to the input of such a system, which will help to build a basic portrait of the necessary specialist and user, and information about the user's past operations with the system, namely, with which specialists he has already interacted and how satisfied he was with it (quality assessment from the user).

At the output, the system should generate ratings for possible recommended specialists, select those with the highest ratings and offer them to the user.

Proposed solutions. During the analysis of the subject area, the following parameters were determined that can be used when solving the task of generating recommendations. Thus, the parameters can be conditionally divided into three groups, depending on which entity they belong to.

The first group corresponds to the medical worker and the vacancies posted by the client, it covers the main parameters that recruiters take into account when searching for candidates. These parameters are:

- age;
- sex;
- education and its degrees;
- professional experience and its duration;
- availability of certifications, licenses, medical certificates, vaccinations;
- list of specializations;
- expected salary;
- language knowledge.

The second group refers to the client itself (a company looking for an employee), namely the minimum necessary information about the client that can be used to clarify the assessment. In it, the parameter is information about past requests.

The third group takes into account parameters corresponding to past inquiries and contains certain information that can be used to analyze the success of the

recruitment. Such parameters are: the status of the request (hiring took place or not); employee assessment; reviews

The key entities in the system are the profiles of medical workers, system clients, requests for the search of medical workers. The point of searching for a candidate is always a search request that has a certain set of characteristics-desires of the client, this is a kind of documented model of the client's preferences. The main idea is to analyze the request from the client, and then find in the system similar requests from other clients that have been successfully implemented (the candidate was found and evaluated by the client).

After finding an array of similar queries, they are ranked by comparison with the current query, where the parameters of both queries are compared to each other to find the level of similarity. The comparison function for each parameter can be arbitrary and depends on the context, but the result will always be a certain number of points that are added to or subtracted from the total similarity value. All requests start with 0 points. In the results, the 10 requests with the highest score, which are considered to be the most similar to the current one, are selected.

The next step is taking the profiles of healthcare professionals that have been proposed and matching them to close these ten similar requests to further compare them with existing candidates. That is, further we compare each available free candidate from the system with these ten benchmarks. The principle of comparison is similar to the principles of query comparison. Each employee profile parameter has its own similarity function, which also calculates points. In this way, we rank the available candidates based on their similarity to the benchmarks.

But that's not all, we additionally adjust the assessment by comparing candidates with the current request. Since some parameters of the candidate's profile and the search request are the same, we have the opportunity to compare the candidate's suitability to the requirements of the request. The result of this adjustment increases or decreases the score of each candidate.

A schematic diagram of the algorithm for generating recommendations can be seen in fig. 1.

As a result, after completing three stages of candidate selection, the system should return ten candidates with the highest score. The user will know the number of points

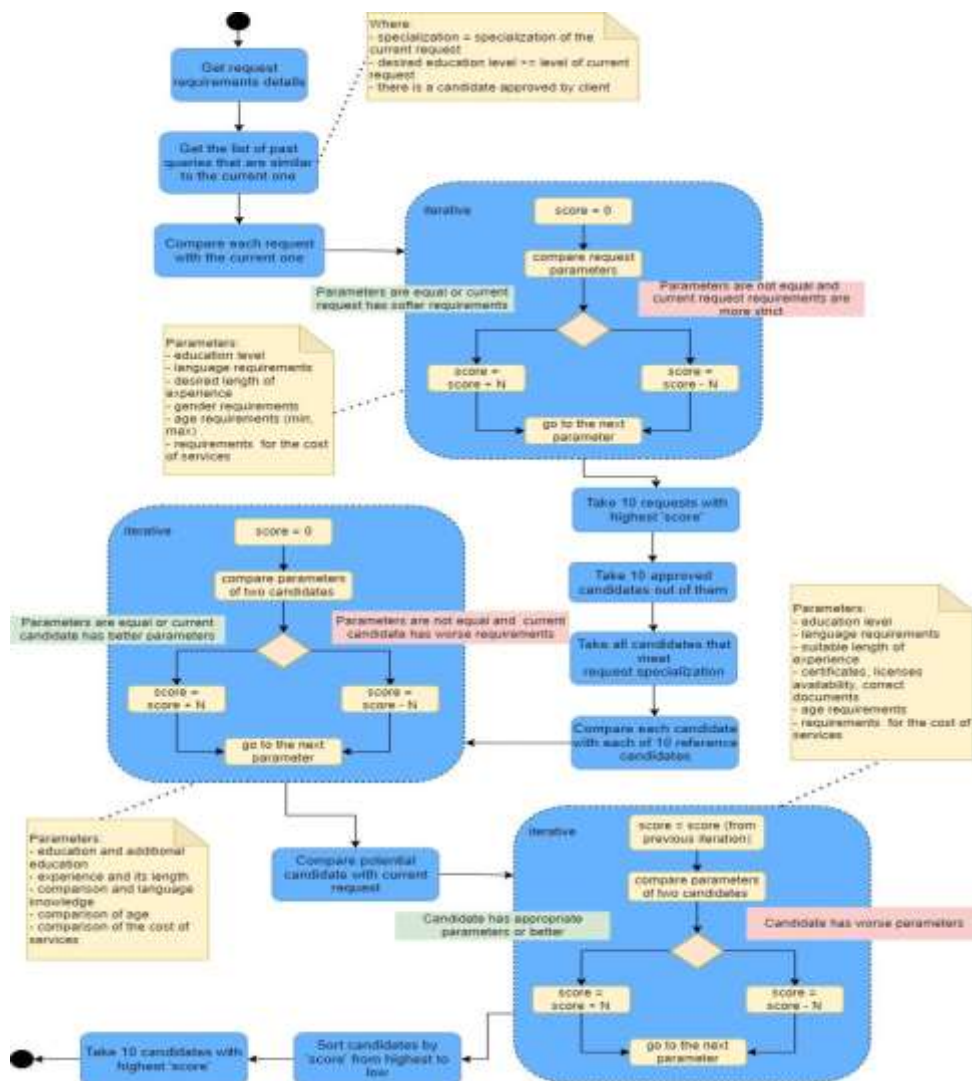


Fig. 1. Scheme of the algorithm for selecting candidates

scored by each candidate, and the candidates will be offered in order from the highest score to the lowest.

To create software, it is necessary to choose a system architecture. Choosing the correct system architecture for implementing a web application is an important step that can significantly affect its quality, performance and scalability. A list of factors that can affect the choice of system architecture is given in [11].

For our solution, it is proposed to choose a three-level client-server architecture, which will allow to remove some risks there.

In our case, data storage will be on a separate database server, which will improve stability and data protection. On another server, there will be a PC that will process the logic. And the user will work directly with a thin client. Fig. 2 shows the general scheme of the chosen three-level client-server architecture.

The client is a Single Page Application, an architectural template that allows you to develop a user interface that never reloads the page, but only dynamically changes its contents. This solution can be developed using the ReactJS library and Redux, which in turn form the React Redux Architecture architectural template. This is a certain analogue of a system based on events and reactions to them.

For the server part, the MVC (Model View Controller) architecture was chosen [12], which allows structuring and dividing the responsibility of individual parts of the server part.

The server part is a set of APIs (Application Programming Interface) for accessing business logic and data. This API is implemented according to the REST (Representational State Transfer) architectural style [13]. It is a set of principles and constraints for building network applications. Web services that are "RESTful" typically use standard HTTP methods (GET, POST, PUT, DELETE, etc.) to perform operations on resources. In the RESTful architecture, "resource" is a key concept, and each resource is identified by a URI (Uniform Resource Identifier). Data in RESTful services is often transmitted in JSON or XML formats.

During the implementation of the software system, a detailed analysis and planning was carried out. The purpose of the analysis was to determine the optimal structure of application components for further convenient maintenance and scaling. These components are a logical continuation of the selected architectures, and only in a more granular way they divide responsibility between system components. To begin with, it is worth considering the component diagram for each application. Fig. 3 shows the general component diagram for the client application.

As we can see, the server part is divided into three layers (fig. 4). These layers further demarcate and structure the responsibilities of system components.

The first layer is the API Layer, its responsibility is to control incoming requests and respond to them. This layer is further divided into groups of components.

API Controllers are direct entry points to the system. Requests from the client system are received here. Controllers clearly understand what to do for each request, which services to call, which error messages to return, which format of the return response. In turn, they use two other groups of components.

Validators are special components that contain all the necessary rules that check the completeness and appropriateness of the input data that comes to the controller.

API Models are a group of components that describe the structure of input and output data.

The next layer is the business logic layer (Business Layer). This layer contains two groups of components.

Services are special components that contain all business logic according to their domain. Each domain entity has its own service. These services carry out data transformation and processing, calculations, etc.

DTO Models are special components – models, which are an alternative representation of domain models, and are used as a means of communication between the API level and the logic level. Regardless, we would have to provide dependencies of the Data Access Layer to the API layer. And this, in turn, would affect the possibility of easily replacing the domain level with another implementation.

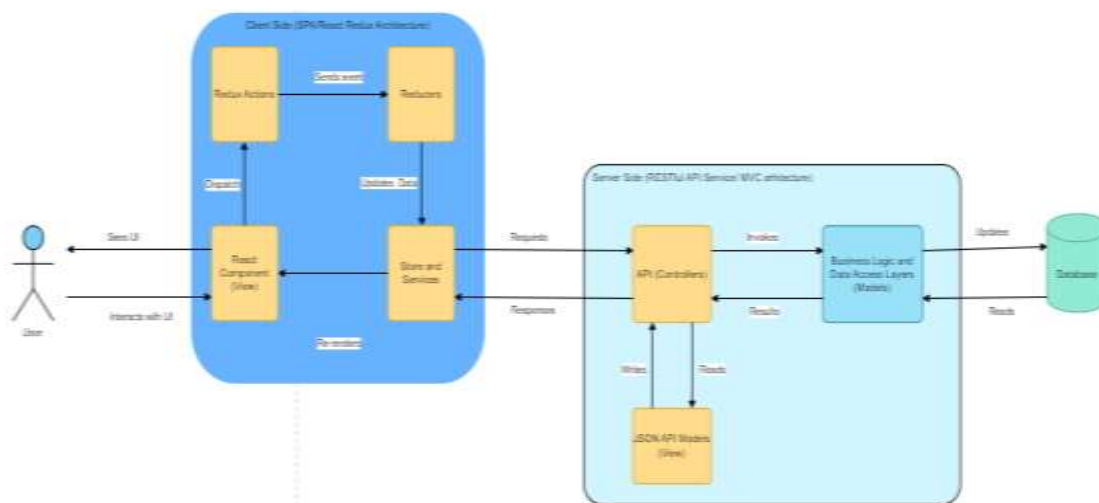


Fig. 2. General scheme of the system architecture

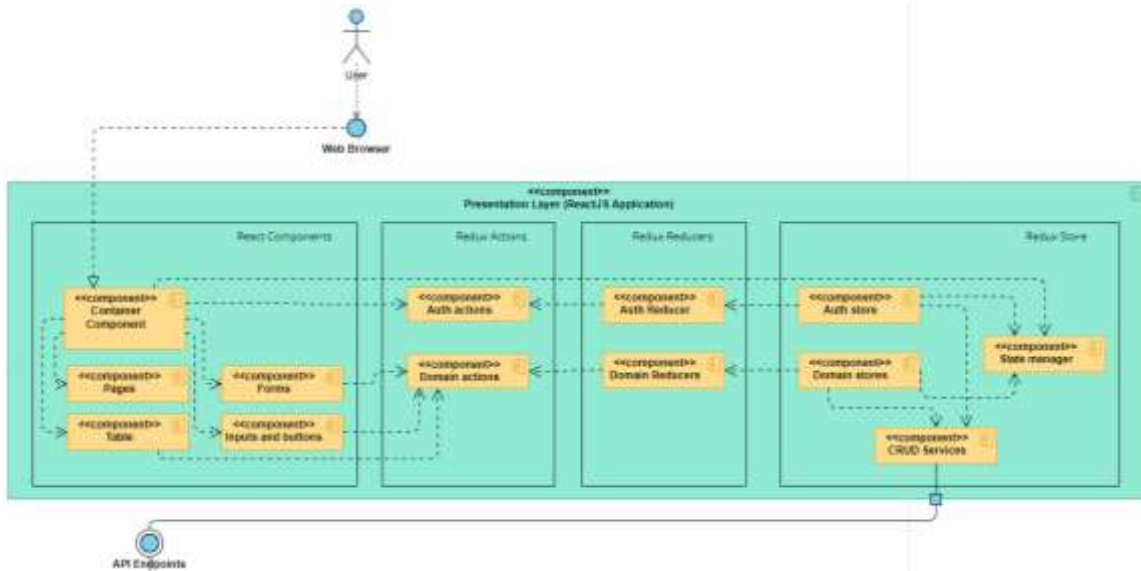


Fig. 3. Diagram of client application components

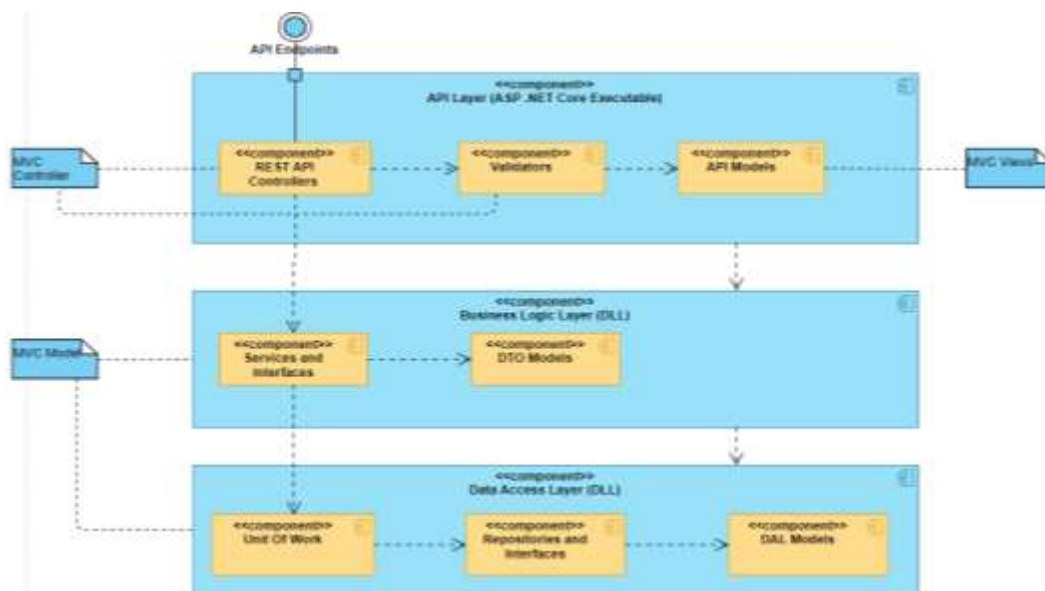


Fig. 4. Diagram of server application components

The last layer is the level of domain models and the level of access to the database, Data Access Layer. This level contains three main components.

UnitOfWork component is responsible for transaction control in the system and access to repositories.

Repositories are a group of components for each entity that contains a group of methods for accessing the database to perform read, write, edit, and delete operations.

DAL Models are domain models, database entity models. They represent the structure for each entity from the database and show the relationships between them.

During the software design work, several class diagrams were developed that reflect the general hierarchy of objects, their relationship types, and attributes. The main domain classes include:

- ClientCompany is a client-company model;
- Candidate is a candidate (medical worker) model;

- HiringRequest is a candidate search request model;
- Discipline is a model of specialization in the medical field;
- Language is a language model that the candidate can sign;
- CandidateEducation is a model of information about the candidate's education;
- WorkExperience is a model of the candidate's work experience;
- User is a system user model required for authorization.

The use of .NET technology was chosen for the server part and business logic. SQL (Structured Query Language) Server was used as a server and database provider. The development environment Visual Studio Community edition was used for the development of the server part. The ReactJS library was used for the client interface.

As a result of the development of the software, all the necessary functionality, including the user interface, was fully implemented.

Experiments were conducted to test the operation of the information system, during which 50 requests were processed and the data of 500 candidates that could be recommended were processed. During the testing, information was collected on the speed of recommendation generation, and proposed candidates were checked for compliance with the vacancy and its requirements. In the table 1 shows several examples of queries that were used for testing.

Table 1 – Examples of candidate search request

Request parameter	Request 1	Request 2	Request 3
Position	Nurse	Surgeon	Trichologist
Direction	Surgery	Neurosurgery	Dermatology
Preferred gender	Man	Is missing	Is missing
Minimum age	30	45	31
Maximum age	55	66	60
Min. rate per hour	59	87	96
Max. rate per hour	151	127	189
Desired level of education	Basic higher education	Master's degree	Master's degree
Duration of experience	5	8	6
Language knowledge	German, Italian, Portuguese	French, Polish	Ukrainian, Spanish

The results of generating recommendations for Request 1: the total number of candidates in the system is 500; the total number of candidates in the system with the chosen specialization is 37; generation time – 0.6 seconds.

The results of generating recommendations for Request 2: the total number of candidates in the system is 500; the total number of candidates in the system with this specialization is 23; generation time – 0.3 seconds.

The results of generating recommendations for Request 3: the total number of candidates in the system is 500; the total number of candidates in the system with this specialization is 31; generation time – 0.4 seconds.

The average recommendation generation time is 0.4 seconds on 50 experiments. We believe that this is a very acceptable result, since during such a period it is possible to generate 10 candidates who potentially fit the given parameters of the request and are selected in comparison with candidates who have already been hired for similar requests. Which significantly speeds up the process of searching for candidates compared to manual processing of a large volume of data. The average time of a cursory review of one resume by a recruiter takes from about 12 seconds to several minutes [14].

Conclusions. The developed software can generate information for the selection of medical professionals based on already existing historical data of past requests from other customers. The developed site can be used for real recruiting systems.

In the future, the improvement of the implemented software can go along the path of adding the following functions:

- allow candidates to register themselves in the system and fill in their data and apply for vacancies;
- add the ability to integrate with third-party systems for data import and export;
- add the ability to recognize photos and documents to automatically extract data and fill in candidate profiles.

References

1. Jones M. T. *Recommender systems, Part 1. Introduction to approaches and algorithms*. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13864749> (access date: 15.11.2023).
2. Codina V. A. *Recommendation System for the Semantic WEB*. URL: <http://www.lsi.upc.edu/~vcodina/papers/dcai10> (access date: 07.10.2023).
3. Chandrashekar H., Bhasker B. *Personalized recommender system using entropy-based collaborative filtering technique*. URL: <https://www.proquest.com/docview/889977175> (access date: 05.10.2023).
4. Smith B., Linden G. *Two Decades of Recommender Systems at Amazon.com*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7927889> (access date: 20.09.2023).
5. *Singular Value Decomposition (SVD) & Its Application in Recommender System*. URL: <https://analyticsindiamag.com/singular-value-decomposition-svd-application-recommender-system/> (access date: 10.10.2023).
6. Seeda P. A. *Complete Guide to Recommender Systems – Tutorial with Sklearn, Surprise, Keras, Recommenders*. URL: <https://towardsdatascience.com/a-complete-guide-to-recommender-system-tutorial-with-sklearn-surprise-keras-recommender-5e52e8ceace1> (access date: 25.09.2023).
7. Aditya S., Rajora M., Singh I. *Hybrid Recommendation System for Item Cold Start Problem*. URL: <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645839> (access date: 7.10.2023).
8. Narducci, F., Lops, P., Semeraro, G. *Power to the patients: The HealthNet social network*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.is.2017.07.005> (access date: 12.10.2023).
9. Han Q., Martinez de Rituerto de Troya I., Ji M., Gaur M., Zejnolovic L. *A Collaborative Filtering Recommender System in Primary Care: Towards a Trusting Patient-Doctor Relationship*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICHI.2018.00062> (access date: 13.10.2023).
10. Waqara M., Majeed M., Dawood H, Daud A. *An adaptive doctor-recommender system*. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/0144929X.2019.1625441> (access date: 14.10.2023).
11. *Implementing the Unit of Work Pattern in Clean Architecture with .NET Core*. URL: <https://medium.com/@edin.sahbaz/implementing-the-unit-of-work-pattern-in-clean-architecture-with-net-core-53efb7f9d4d> (access date: 03.11.2023).
12. *Everything you need to know about MVC architecture*. URL: <https://towardsdatascience.com/everything-you-need-to-know-about-mvc-architecture-3c827930b4c1> (access date: 29.10.2023).
13. *Tutorial: Create a web API with ASP.NET Core*. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/tutorials/first-web-api> (access date: 04.11.2023).
14. *Do Recruiters Really Only Spend 6 Seconds Reading Your Resume?* URL: <https://newsletter.jobsearch.guide/p/do-recruiters-really-spend-6-seconds> (access date: 14.11.2023).

References (transliterated)

1. Jones M. T. *Recommender systems, Part 1. Introduction to approaches and algorithms*. Available at:

- <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13864749> (accessed 15.11.2023).
- Codina V. A. *Recommendation System for the Semantic WEB*. Available at: <http://www.lsi.upc.edu/~vcodina/papers/dcai10> (accessed 07.10.2023).
 - Chandrashekar H., Bhasker B. *Personalized recommender system using entropy-based collaborative filtering technique*. Available at: <https://www.proquest.com/docview/889977175> (accessed 05.10.2023).
 - Smith B., Linden G. *Two Decades of Recommender Systems at Amazon.com*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7927889> (accessed 20.09.2023).
 - Singular Value Decomposition (SVD) & Its Application in Recommender System*. Available at: <https://analyticsindiamag.com/singular-value-decomposition-svd-application-recommender-system/> (accessed 10.10.2023).
 - Seeda P. A. *Complete Guide to Recommender Systems – Tutorial with Sklearn, Surprise, Keras, Recommenders*. Available at: <https://towardsdatascience.com/a-complete-guide-to-recommender-system-tutorial-with-sklearn-surprise-keras-recommender-5e52e8ceace1> (accessed 25.09.2023).
 - Aditya S., Rajora M., Singh I. *Hybrid Recommendation System for Item Cold Start Problem*. Available at: <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645839> (accessed 07.10.2023).
 - Narducci, F., Lops, P., Semeraro, G. *Power to the patients: The HealthNet social network*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.is.2017.07.005> (accessed 12.10.2023).
 - Han Q., Martinez de Rituerto de Troya I., Ji M., Gaur M., Zejnolic L. *A Collaborative Filtering Recommender System in Primary Care: Towards a Trusting Patient-Doctor Relationship*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICHI.2018.00062> (accessed 13.10.2023).
 - Waqara M., Majeed M., Dawood H, Daud A. *An adaptive doctor-recommender system*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/0144929X.2019.1625441> (accessed 14.10.2023).
 - Implementing the Unit of Work Pattern in Clean Architecture with .NET Core*. Available at: <https://medium.com/@edin.sahbaz/implementing-the-unit-of-work-pattern-in-clean-architecture-with-net-core-53efb7f9d4d> (accessed 03.11.2023).
 - Everything you need to know about MVC architecture*. Available at: <https://towardsdatascience.com/everything-you-need-to-know-about-mvc-architecture-3c827930b4c1> (accessed 29.10.2023).
 - Tutorial: Create a web API with ASP.NET Core*. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/tutorials/first-web-api> (accessed 04.11.2023).
 - Do Recruiters Really Only Spend 6 Seconds Reading Your Resume?* Available at: <https://newsletter.jobsearch.guide/p/do-recruiters-really-spend-6-seconds> (accessed 14.11.2023).

Received 20.11.2023

УДК 004.9

В. В. ЯМБУРЕНКО, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків, Україна, e-mail: yamburenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4797-8684>

І. В. ЛЮТЕНКО, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна, e-mail: cherliv68@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1825>

А. М. КОПП, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна, e-mail: korr93@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

Д. М. ГОЛОВНЯ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків, Україна, e-mail: dimagolovnya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0901-025X>

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПІДБОРУ МЕДИЧНОГО ПЕРСОНАЛУ

В роботі будь-якої організації є багато рутинної роботи, в тому числі і в агентствах по найму персоналу. Ефективна організація управління та автоматизації діяльності співробітників рекрутингових агентств – непросте завдання. Система повинна автоматизувати рутинні дії робітників рекрутингових агентств та бути зручною для їх клієнтів. Ця робота пропонує підхід для автоматизації роботи по підборі необхідного медичного персоналу. Не всі інформаційні системи, що використовуються рекрутинговими агентствами можуть робити порівняння кандидатів та генерувати пропозиції, які включають декілька найкращих кандидатів. На підставі аналізу предметної області були визначені групи параметрів, які суттєво впливають на вибір медичного персоналу. Запропонований підхід полягає у тому, щоб проаналізувати запит від клієнта, а потім віднайти в системі схожі на нього за параметрами запити інших клієнтів, по яким вже було знайдено кандидата. Наступним кроком береться профілі медичних працівників, що були запропоновані для цих запитів (вони виступають як еталонні) для подальшого порівняння їх із існуючими кандидатами. Для кожного параметра профілю працівника є своя функція схожості. Наявні кандидати отримують оцінки, після чого відбувається їх ранжування. Також додатково проводимо корегування оцінки шляхом порівняння кандидатів із поточним запитом. Для автоматизації діяльності по підборі медичного персоналу було розроблено програмне забезпечення. Для його реалізації запропонована трьохрівнева клієнт серверна архітектура. Для серверної частини було обрано MVC (Model View Controller) архітектуру. Для клієнтської частини використаний архітектурний шаблон Single Page Application. Серверна частина розбита на три шари, які додатково розмежовують та структурують відповідальність компонентів системи. Для реалізації бізнес логіки використано технології .NET. Для сервера та провайдеру баз даних використано SQL Server. Використання програмної реалізації розробленої системи продемонструвало досить непогані результати. Середній час підбору 10 кращих кандидатів з 500 становить 0,4 секунди, а обробка тільки 1 резюме людиною займає декілька хвилин.

Ключові слова: підбір персоналу, автоматизація, обробка даних, алгоритм, програмне забезпечення, системна архітектура, технології розробки.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Ямбуренко Віктор Вікторович, Yamburenko Viktor Viktorovich

Автор 2 / Author 2: Лютенко Ірина Вікторівна, Liutenko Iryna Viktorivna

Автор 3 / Author 3: Копп Андрій Михайлович, Korr Andrii Mykhailovich

Автор 4 / Author 4: Головня Дмитро Миколайович, Holovnia Dmytro Mykolaiovych

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.08

УДК 51-73

О. С. МАЗМАНІШВІЛІ, доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФПІ, м. Харків, Україна, e mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>

Г. Ю. СИДОРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХПІ», доцент кафедри моделювання систем і технологій ХНУ ім. В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна, e mail: annsydorenko01@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ПЛОСКОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ У НЕОДНОРІДНОМУ НЕПОГЛИНАЮЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто аналітичні рішення параболічного рівняння Ісімару для функції когерентності електромагнітного поля, що описують часові властивості імпульсу на виході неоднорідного недисипативного середовища. Отримано узагальнення підходу, використаного в моделі Ісімару для опису часової еволюції монохроматичного електромагнітного імпульсу, що огинає, в однорідних недисипативних середовищах, на випадок неоднорідних недисипативних середовищ. Тим самим було зроблено спробу врахувати вплив неоднорідності середовища на форму результуючого імпульсу. При вирішенні поставленої задачі подолано труднощі, пов'язані з обчисленням континуального інтеграла, що виникає, в просторі дифузійних траєкторій. Це дозволило отримати явний вираз для функції Гріна завдання та побудувати обчислювальний алгоритм, на базі якого проведено низку численних експериментів. Аналіз роботи проведено виходячи з апарату квадратичних інтегральних функціоналів, заснованих на рішеннях диференціальних стохастичних рівнянь. У роботі вивчені інваріантні часові властивості огинаючої монохроматичних електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар розсіюючого неоднорідного середовища, тобто. властивостей, які залишаються незмінними при варіації параметрів середовища, зокрема, розподілу концентрації центрів, що розсіюють. Проаналізовано динаміку формування часових шлейфів розсіяної хвилі, у яких хвостова частина розташована в периферійній часовій ділянці. При поширенні зі швидкістю перетворення фронту хвилі відбиває вид шарів області розсіювання та її поздовжню форму. Зазначається, розвитком запропонованого апроксимаційного підходу щодо процесів, що впливають на часове затягування електромагнітних імпульсів, може бути облік згасання випромінювання при його поширенні в неоднорідному поглинаючому середовищі.

Ключові слова: монохроматичні електромагнітні імпульси, неоднорідне середовище, що розсіює, рівняння Ісімару, форма результуючого імпульсу, інваріантна лагерівська форма, чисельні експерименти.

Вступ. В статті поставлено і розглянуто завдання про форму імпульсу, що поширюється в неоднорідному і непоглинаючому середовищі типу, що розсіює. У роботі як вихідний використаний електромагнітний імпульс у вигляді δ -функції щодо напрямку поширення. Таким чином, йдеться, по суті, про функцію Гріна розглянутого завдання. Імпульси проходять крізь шар товщини L , що містить розсіювальні центри з довільним профілем концентрації $\rho(z)$ вздовж осі поширення z , при цьому саме розсіювання вважається малокутовим [1, 2].

При розгляді будуть прийняті такі припущення:

- вихідна (стартова хвиля) є плоскою;
- показники середовища, будучи змінними в просторі, є постійними в часі; ці характеристики будуть покладатися відомими та заданими;
- просторові характеристики середовища асиметрично симетричні щодо напрямку поширення випромінювання;

- розглянуте випромінювання являє собою монохроматичну хвилю з імпульсною огинаючою.

Третє припущення означає, що характеристики середовища змінюються шарами, паралельними до фронту вихідної плоскої хвилі. Хоча можна розглянути загальніший випадок, ніжче ми обмежимося цим припущенням, маючи на увазі отримання результатів принципового плану.

У роботі розглянуті часові властивості огинаючої монохроматичних електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар неоднорідного середовища, що розсіює. Особливу увагу звернено на властивості, що характерні всім аналізованим середовищам. Завдяки інформації про інваріантні властивості стає можливим додаткова перевірка відповідності досвідчених даних та їх інтерпретація, не пов'язана з конкретними параметрами середовища розповсюдження. Такі властивості передавальної функції, як позитивна визначеність, звернення в нуль на початку імпульсу та на його периферії, єдиність

© Мазманішвілі О. С., Сидоренко Г. Ю., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПІ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



максимуму та наявність лише двох точок перегину, є якісними ознаками і легко ідентифікуються.

Задачу про функцію Гріна середовища, що містить центри, що розсіюють, можна віднести до класичних. Різні фізичні та обчислювальні аспекти цієї проблеми вже давно обговорюються у наукових фахових виданнях [1–7]. Рівняння, які описують поширення імпульсів, дуже складні, тому отримання повних аналітичних рішень поставленої завдання є питанням майбутнього. Як правило, в публікаціях наводяться точні вирази для перших статистичних моментів огинаючої імпульсу або деякі вирази, справедливі в рамках обраних наближень. Наявні ж точні аналітичні вирази представлені переважно у вигляді континуальних інтегралів та/або розкладів у нескінченні ряди. У тих роботах, де наведено аналітичне рішення завдання у явному вигляді, воно, як правило, відноситься до спрощених моделей. Для вирішення вихідних рівнянь часто використовують різноманітні чисельні методи.

Мета роботи полягає у вивченні інваріантних властивостей огинаючої монохроматичних часових електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар розсіюючого неоднорідного середовища, тобто. властивостей, що залишаються незмінними при варіації параметрів середовища, зокрема, розподілу концентрації центрів, що розсіюють. Особливу увагу приділено поздовжнім розмірам результуючого імпульсу, що визначає його роздільні властивості.

Вихідні припущення. Поставимо завдання про форму імпульсу, який поширюється в неоднорідному і непоглинаючому середовищі типу, що розсіює.

Обговоримо зазначені вище припущення та обмеження, що впливають з них, на область застосування результуючих виразів. У лінійному наближенні вихідний $I_m(t)$ та імпульс на виході із середовища $I(t)$, пов'язані відомим виразом [1–3]

$$I(t) = \int G(t-t')I_m(t')dt' \quad (1)$$

і за формою $I_m(t)$ можна визначити $I(t)$, якщо визначена функція Гріна $G(t-t')$.

Перейдемо до формулювання вихідних рівнянь. Шукана функція Гріна є Фур'є-перетворенням функції когерентності Γ :

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int \Gamma(\omega_d) \exp(-i\omega_d t) d\omega_d. \quad (2)$$

У свою чергу, для функції Γ в фізичній ситуації, що розглядається, поширення плоскої електромагнітної хвилі в дифузійно-розсіюючому непоглинаючому середовищі маємо [1, 2]

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + b(z)\mathbf{r}^2 \right) \Gamma(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0. \quad (3)$$

Тут $a = k_d/2k^2$; k – хвильове число монохроматичної хвилі, що поширюється; $k_d = \omega_d/c$; c – швидкість світла;

$$b(z) = (4\alpha_p)^{-1} \rho(z)\sigma_s(z)k^2, \quad (4)$$

де $\rho(z)$ – концентрація розсіювальних центрів; $\sigma_s(z)$ – переріз розсіювання; α_p – кутовий параметр розсіювання, а як аргументи функції когерентності Γ вказані поздовжня координата поширення z та поперечний вектор \mathbf{r} .

Рівняння (3) є диференціальним рівнянням у часткових похідних параболічного типу з потенціалом квадратичного виду

$$U(z, \mathbf{r}) = b(z)\mathbf{r}^2, \quad (5)$$

крутість якого залежить від координати z і початковою умовою $\Gamma(z=0, \mathbf{r})=1$, що забезпечує властивість функції Гріна $G(t-t')|_{z=0} = \delta(t-t')$.

Рівняння (3) відноситься до класу рівнянь Хілла і в загальному випадку його аналітичних рішень потенціалу $U(z, \mathbf{r})$ довільного виду отримати не вдається. Істотним виявляється тому те що, що з потенціалу квадратичного виду (5) апроксимаційне рішення функції Гріна $G(t)$ побудувати можливо.

Рівняння для двочастотної функції когерентності. Розглянемо шар, що розсіює, товщина якого (вздовж осі z) дорівнює L . Розіб'ємо довжину L на N ділянок $\{\Delta_n\}$: $L = \sum_{n=1}^N \Delta_n$. Нехай величини $\rho(z)$ та $\sigma_s(z)$ задані і є безперервними функціями z . Виберемо ділянки $\Delta_n = z_n - z_{n-1}$, $n = 1, \dots, N$ таким чином, щоб передати всі істотні деталі потенціалу $U(z, \mathbf{r})$, і позначимо $b_n = b(z_n)$, $\rho_n = \rho(z_n)$ і $\sigma_n = \sigma_s(z_n)$. Маючи на увазі випадок $N \gg 1$, замінімо в потенціалі $U(z, \mathbf{r})$ всі значення, що лежать усередині кожної n -ої ділянки, $1 \leq n \leq N$, на величину $U(z_n, \mathbf{r})$, де $z_n = \sum_{m=1}^n \Delta_m$ – права межа ділянки. Отриманий таким чином потенціал $U(z, \mathbf{r})$, що є кусково-постійною функцією від z , будемо використовувати нижче в апроксимаційному рівнянні (8).

Наблизимо рішення рівняння $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$, що є рішенням апроксимаційного рівняння зі кусково-постійним за z виразом $U_N(z, \mathbf{r})$ для потенціалу $U(z, \mathbf{r})$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + U_N(z, \mathbf{r}) \right) \Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0, \quad (6)$$

з умовою $\Gamma_N(0, \mathbf{r}; \omega_d) = 1$. Якщо буде знайдено рішення рівняння (7) для Γ_N то потрібна функція когерентності буде впливати з нього в межі при $N \rightarrow \infty$. Рівнянню (6) еквівалентна послідовність рівнянь ($n = 1, \dots, N$)

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + U_n(z_n, \mathbf{r}) \right) \Gamma_n(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0, \quad (7)$$

розв'язок яких визначаються початковою умовою $\Gamma_N(z=0, \mathbf{r}; \omega_d) = 1$ і ланцюжком граничних умов

$y_{n+1}(z_n) = y_n(z_n)$, $n = 1, \dots, N$, де $y_n(z)$ – функція $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$ на n -й ділянці.

Перейдемо до розв'язання розгорнутої системи рівнянь (7). Розглянемо для цього n -ту ділянку в (7). У цій ділянці потенціал U_n залежить від координати z_n як от параметра, $U_N(z, \mathbf{r}) = b(z)\mathbf{r}^2 \equiv b_n\mathbf{r}^2$, де $b_n = (4\alpha_p)^{-1} \rho(z_n)\sigma_s(z_n)k^2$.

Кожне з рівнянь (10) є параболічним рівнянням за z у часткових похідних з кусково-постійним потенціалом. Шукатимемо рішення n -го рівняння на інтервалі (z_{n-1}, z_n) у вигляді:

$$\Gamma_n(z, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f(z)} \exp[g(z)\mathbf{r}^2]. \quad (8)$$

Така форма шуканого розв'язку обумовлена параболічною властивістю потенціалу по \mathbf{r} . З (7) і (8) випливають наступні рівняння для введених функцій $f(z)$ та $g(z)$:

$$-\frac{1}{f(z)} \frac{df(z)}{dz} + 4iag(z) = 0, \quad (9 \text{ a})$$

$$\frac{dg(z)}{dz} + 4iag^2(z) + b_n = 0. \quad (9 \text{ b})$$

Розглянемо друге рівняння із системи (9), що є рівнянням Ріккати. Нехай $g_n = g(z_n)$, тоді для всіх n розв'язання цього рівняння з початковою умовою $g(z_{n-1}) = g_{n-1}$ має вигляд

$$g(z) = \frac{g_{n-1} - (4ia/b_n)^{-1/2} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1}))}{1 + (4ia/b_n)^{1/2} g_{n-1} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1}))},$$

а на його правому кінці

$$g_n = \frac{g_{n-1} - (4ia/b_n)^{-1/2} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}\Delta_n)}{1 + (4ia/b_n)^{1/2} g_{n-1} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}\Delta_n)}. \quad (10)$$

Функція $f(z)$ знаходиться з (9) з початковою умовою $f(z_{n-1}) = f_{n-1}$, де f_{n-1} – значення функції на правому кінці попередньої $(n-1)$ -ої ділянки

$$\frac{f(z)}{f_{n-1}} = \cos(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1})) + \sqrt{4ia/b_n} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1})),$$

а на його правому кінці

$$f_n = \left[\cos(\sqrt{4iab_n}\Delta_n) + \sqrt{\frac{4ia_n}{b_n}} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n}\Delta_n) \right] f_{n-1}. \quad (11)$$

Отже, функція когерентності $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$ при $z = z_N = L$ дорівнює

$$\Gamma_N(z_N, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f_N} \exp(g_N \mathbf{r}^2), \quad (12)$$

при цьому послідовності $\{f_n\}$ і $\{g_n\}$, $1 < n \leq N$, визначаються з рекурентних співвідношень (10) і (11), а також початкових умов $f_0(0) = 1$ і $g_0(0) = 0$. Зокрема, у точці прийому, коли $\mathbf{r} = 0$ та $z = L$, маємо

$$\Gamma_N(L, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f_N(z_N)}. \quad (13)$$

Функція Гріна. Нехай T_1 – час поширення початкової точки імпульсу. Тоді функція імпульсного відгуку (функція Гріна) наступна

$$G_N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t - T_1))}{f_N(\omega, \omega_d)} d\omega_d, \quad (14)$$

при цьому у функції $f_N = f_N(\omega, \omega_d)$ зазначена залежність як від частоти різниці ω_d (змінної інтегрування), так і від частоти ω монохроматичного імпульсу.

З рекурентного співвідношення (11) випливає

$$f_N = \prod_{n=1}^{N-1} \left[\cos(\sqrt{4iab_n}\Delta_n) + \sqrt{\frac{4ia_n}{b_n}} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n}\Delta_n) \right]. \quad (15)$$

Припустимо далі, що функція $b(z)$ – гладка (різкі межі та розриви концентрації відсутні). Тоді з (11) випливає

$$\operatorname{tg}(\varphi_n) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{n-1}) - \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}\Delta_n)}{1 + \operatorname{tg}(\varphi_{n-1}) \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}\Delta_n)},$$

де $\operatorname{tg}(\varphi_n) = \sqrt{4ia/b_n} g_n$. Звідки отримуємо $\varphi_{n+1} = \varphi_n - \sqrt{4ia/b_n}\Delta_n$, що призводить до рівності $\varphi_N = -\sum_{n=1}^N \sqrt{4iab_n}\Delta_n$, тому

$$g_N = -\frac{1}{\sqrt{4ia/b_N}} \operatorname{tg}\left(\sum_{j=1}^N \sqrt{4iab_j}\Delta_j\right). \quad (16)$$

Підставляючи цей вираз у співвідношення (15), послідовно знайдемо

$$f_N = \cos\left(\sum_{n=1}^N \sqrt{4iab_n}\Delta_n\right). \quad (17)$$

Оскільки $ab_n = (\rho_n \sigma_n \omega_d)(8\alpha_p c)^{-1}$, де $\rho_n = \rho(z_n)$ та $\sigma_n = \sigma_s(z_n)$, тоді для функції Гріна отримаємо

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t - T_1))}{\cos\left(\sum_{n=1}^N \Delta_n \sqrt{(\rho_n \sigma_n) / (2\alpha_p c)}\right)} d\omega_d. \quad (18)$$

У виразі $\tau^{1/2} = \sum_{n=1}^N \Delta_n \sqrt{(\rho_n \sigma_n) / (2\alpha_p c)}$ сума в правій частині в межі $N \rightarrow \infty$ перетворюється на інтеграл $\tau^{1/2} = (2\alpha_p c)^{-1/2} \int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma_s(z)} dz$, що дає такий вираз:

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t-T_1))}{\cos \sqrt{i\omega_d \tau}} d\omega_d.$$

Використовуючи заміну $\omega_d = is$, отримаємо остаточно шуканий вираз для функції Гріна, що формально збігається з відомим рішенням рівняння Ісімару [1, 2] для однорідних розсіювальних середовищ

$$G(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[s(t-T_1)]}{\operatorname{ch} \sqrt{s\tau}} ds. \quad (19)$$

Цей вираз залежить від двох параметрів T_1 та τ . Перший відповідає за час приходу імпульсу як цілого і дорівнює відношенню довжини шляху L до швидкості світла c . Другий визначає розширення імпульсу. Наведемо ще одне представлення для функції Гріна

$$G(t) = \frac{1}{2\pi i \tau} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[\eta(t-T_1)/\tau]}{\operatorname{ch} \sqrt{\eta}} d\eta, \quad (20 \text{ a})$$

$$T_1 = L/c, \quad \tau = \frac{1}{2\alpha_p c} \left(\int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma(z)} dz \right)^2. \quad (20 \text{ b})$$

Отримані вирази (20) відрізняються від відомого результату Ісімару [1] тим, що вони справедливі для неоднорідних середовищ.

Фізична інтерпретація. Імпульсу із заданою часовою залежністю $I_{in}(t)$ відповідатиме імпульс на виході з середовища, що описується виразом

$$I(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} I_{in}(t') dt' \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[s(t-t'-T_1)]}{\operatorname{ch} \sqrt{s\tau}} ds. \quad (21)$$

Нехай площину $z=0$ стартовий імпульс досяг у момент часу $t=0$. Поширюючись в середовищі, що розсіює, він досягне площини $z=L$ і в цьому місці буде мати форму $I(t)$ [8]. Проаналізуємо параметри цього імпульсу. З цією метою визначимо значення його перших трьох моментів $\langle t^n \rangle = \int_0^{\infty} t^n I(t) dt$, $n=0,1,2$, при цьому приймемо, не обмежуючи спільності, що стартовий імпульс має запасну енергію, за величиною чисельно рівну одиниці. Цікаві моменти будемо відраховувати від T_1 :

$$\langle (t-t'-T_1)^n \rangle = (-1)^n \frac{d^n}{ds^n} \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{s\tau}} \Big|_{s=0}. \quad (22)$$

З урахуванням припущення про одиничну енергію стартового імпульсу при $n=0$ для нульовому моменту знайдемо $\langle 1 \rangle_L = 1$, що відповідає прийнятій моделі поширення випромінювання без поглинання. Далі з (22) отримаємо

$$\langle (t-T_1) \rangle_L = \frac{1}{2} \tau + \langle t' \rangle_0, \quad (23)$$

звідки випливає, що середній за імпульсом момент приходу дорівнює $T_1 + \tau/2$ з урахуванням першого

моменту $\langle t' \rangle_0$ стартового імпульсу. При $n=2$ знайдемо для середньої тривалості імпульсу $\sqrt{D_L}$

$$D_L = \langle (t-T_1)^2 \rangle_L = \frac{1}{6} \tau^2 + D_0, \quad (24)$$

де $\sqrt{D_0}$ – середня тривалість вихідного імпульсу. Таким чином, до дисперсії D_0 додається величина $\tau^2/6$. Якщо вихідний імпульс як функція часу є δ -функцією, $I_{in}(t') = \delta(t')$, то в результаті поширення в розсіюючому середовищі його середня тривалість складе

$$\sqrt{D_L} = \tau/\sqrt{6} = \frac{1}{\sqrt{24\alpha_p c}} \left(\int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma_s(z)} dz \right)^2, \quad (25)$$

таким чином, тривалість імпульсу відображає поздовжні варіації концентрації середовища, що розсіює. У окремому випадку однорідної вздовж осі z середовища, коли $\rho(z)$ та $\sigma(z)$ постійні, отримаємо $\sqrt{D_L} = (\rho\sigma_s L^2)(\sqrt{24\alpha_p c})^{-1}$, тобто середня тривалість імпульсу зростає пропорційно квадрату прогнаної відстані L [9].

Чисельне моделювання. Через значне різноманіття варіантів параметрів середовища, що розсіює, чисельне моделювання проведемо, використовуючи відносні значення [10–12].

Як робочу формулу використовуємо наступну

$$I(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_{in}(t') dt' \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[iu(t-t'-L/v)]}{\operatorname{ch} \sqrt{iut}} du, \quad (26)$$

де L – довжина пройденого шляху фронту зондувального імпульсу на момент t , v – швидкість імпульсу, а сам імпульс виберемо гауссівської форми з дисперсією τ^2 :

$$I_{in}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\tau^2}\right). \quad (27)$$

Як ефективне середньоквадратичне відхилення τ оберемо

$$\tau = \left(\int_0^L N(z) dz \right)^2, \quad (28)$$

де $N(z)$ – ефективна густина центрів розсіювання середовища.

Для чисельного моделювання виберемо як форму зондувального імпульсу гауссівську функцію (27), яка має середньоквадратичне відхилення на старті $\tau = 0.05$ і поширюється зі швидкістю $v = 0.1$.

На рис. 1–5 показані приклади утворення 5 шлейфів розсіяної хвилі на вибраних відстанях у разі відсутності розсіювальних центрів та у разі їх наявності на інтервалі.

У першому випадку (рис. 1) розсіювальне середовище відсутнє і стартовий імпульс $I_{in}(t')$ поширюється зі швидкістю v без змін як ціле.

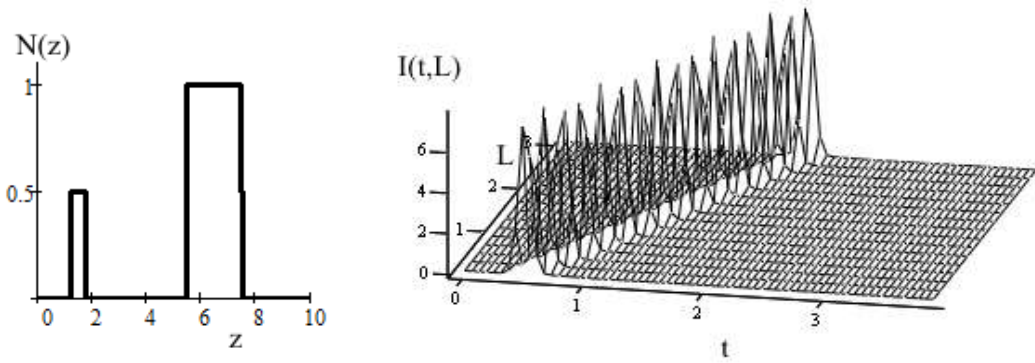


Рис. 1. Профіль зони розсіювання та сімейство часових імпульсів $I(t, L)$; $N(z) = 0$

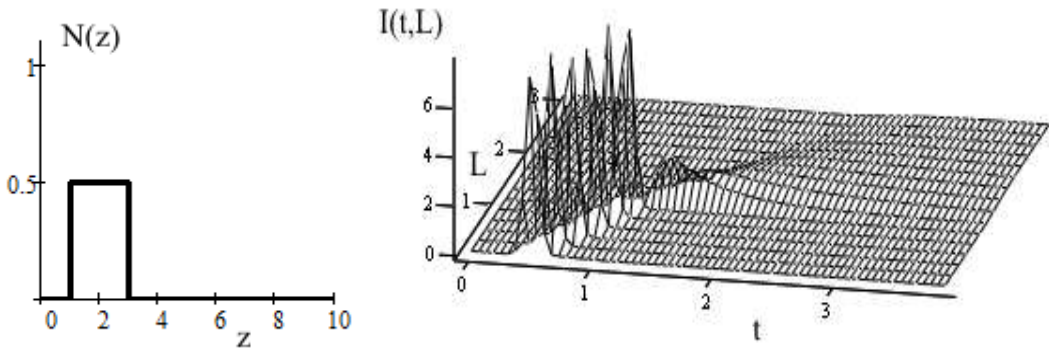


Рис. 2. Профіль зони розсіювання та сімейство часових імпульсів $I(t, L)$; $N(z) = 0.1$ на інтервалі $1 \leq z \leq 3$

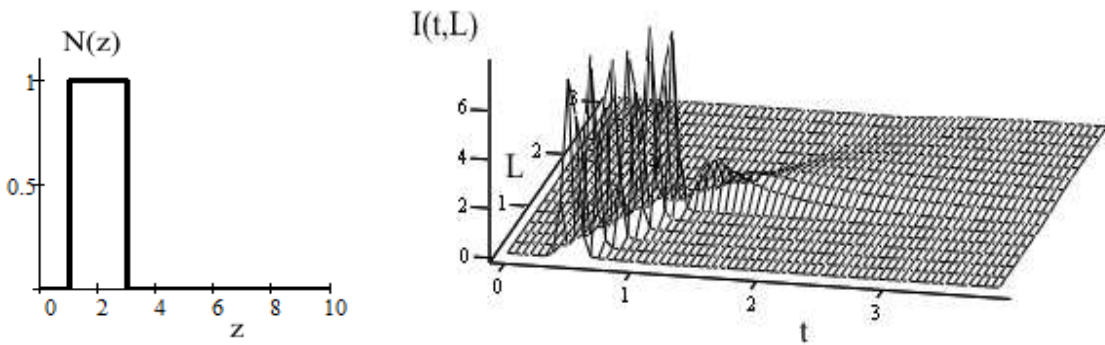


Рис. 3. Профіль зони розсіювання та сімейство часових імпульсів $I(t, L)$; $N(z) = 0.2$ на інтервалі $1 \leq z \leq 3$

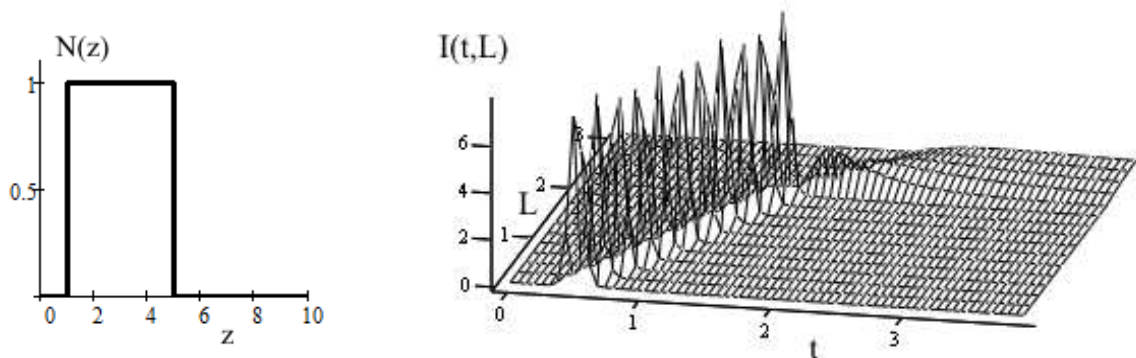


Рис. 4. Профіль зони розсіювання та сімейство часових імпульсів $I(t, L)$; $N(z) = 0.2$ на інтервалі $2 \leq z \leq 6$

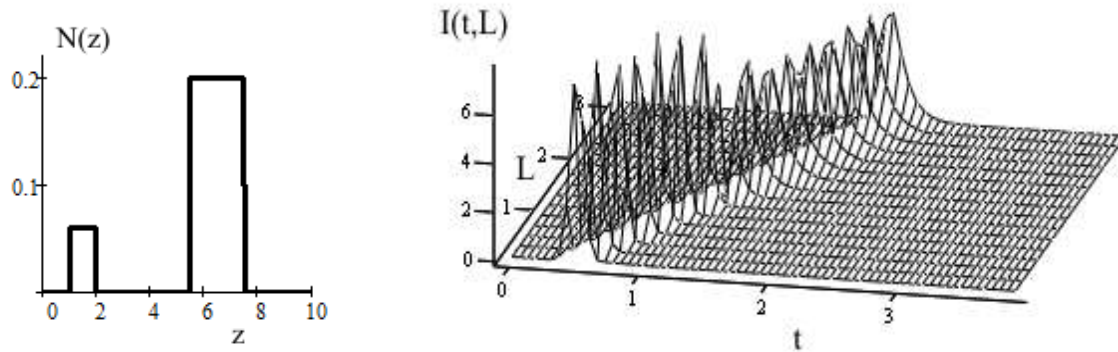


Рис. 5. Профіль зони розсіювання та сімейство часових імпульсів $I(t, L)$;
 $N(z) = 0.5$ на інтервалі $1 \leq z \leq 2$ та $N(z) = 1.0$ на інтервалі $5.5 \leq z \leq 7.5$

У другому випадку розглянуті різні шари, що розсіюють. На рис. 2–5 видно динаміку формування часових шлейфів розсіяної хвилі, у яких хвостова частина розташована в периферійній часовій ділянці t .

При поширенні зі швидкістю v перетворення фронту хвилі відбиває вид шарів області розсіювання та її поздовжню форму. Шлейф, що утворюється за фронтом хвилі, тим довший, чим більша ефективна дисперсія τ^2 , яка в свою чергу визначається ефективною щільністю центрів розсіювання середовища $N(z)$.

При цьому дисперсія τ^2 в результаті інтегрування утворюється з усіх можливих ділянок зони розсіювання згідно (27).

З сімейства кривих $I(t, L)$, наведених на рис. 1–5, видно, що вони мають лагерривську властивість [9], а саме: функція $I(t, L)$ тотожно дорівнює нулю при $t = 0$ (флуктуаційна область), функція $I(t, L)$ має один максимум і дві точки перегину (основна область), функція $I(t, L)$ має експонентну асимптотику при великих t (периферійна область). Зазначимо, що з формул (27), (28) випливає можливість розгляду різних видів залежності концентрації та перерізу розсіювання від поточної координати z .

Висновок. Зазначимо, що розвитком запропонованого апроксимаційного підходу щодо процесів, що впливають на часове затягування електромагнітних імпульсів, може бути облік згасання випромінювання при його поширенні в неоднорідному поглинаючому середовищі. Математичною основою при цьому послужить облік у параболічному рівнянні (3) доданку, пов'язаного з поглинанням, при цьому коефіцієнти рівняння можуть залежати від поздовжньої координати. Зазначимо також, що аналіз еволюції форми часового імпульсу при його поширенні дає можливість судити про просторовий розподіл характеристик розсіювального середовища вздовж осі розповсюдження.

Список використаної літератури

1. Ishimaru A. Theory and Application of Wave Propagation and Scattering in Random Media. *Proc. IEEE*. 1977. Vol 65. P. 1030–1061.

2. Исимуру А. *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах*. Москва: Мир, 1981. Т.1, 280 с. Т. 2. 317 с.
3. Flatte S. M. Wave Propagation Through Random Media: Contributions from Ocean Acoustics. *Proc. IEEE*. 1983. Vol. 71. P. 1267–1294.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. *Введение в статистическую радиофизику*. Москва: Наука, 1966. 404 с.
5. Хелстром К. *Квантовая теория проверки гипотез и оценивания*. Москва: Мир, 1979. 344 с.
6. Феллер В. *Введение в теорию вероятностей и её приложения*. Москва: Мир, 1984. 640 с.
7. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Наука, 2004. 356 с.
8. Галуза А. А., Мазманишвили А. С. Форма импульса, распространяющегося с неоднородной непоглощающей среде. *Радиофизика и Радиоастрономия*. 1997. № 2. С. 353–358.
9. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Наука, 2004. 356 с.
10. Вірченко Н. О. *Основні методи розв'язання задач математичної фізики*. Київ: Воля, 2006. 332 с.
11. Пирс Дж. Р. *Теория и расчет электронных потоков*. Москва: Сов. радио, 1956. 254 с.
12. Андруник В. А., Висоцька В. А., Пасічник В. В. *Чисельні методи в комп'ютерних науках*. Львів: Новий світ-2000, 2018. 536 с.

References (transliterated)

1. Ishimaru A. Theory and Application of Wave Propagation and Scattering in Random Media. *Proc. IEEE*. 1977, vol. 65, pp. 1030–1061.
2. Ishimaru A. *Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnykh sredah*. [Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media]. Moscow, Myr Publ., 1981, vol. 1, 280 p.; vol. 2. 317 p.
3. Flatte S. M. Wave Propagation Through Random Media: Contributions from Ocean Acoustics. *Proc. IEEE*. 1983, vol. 71, pp. 1267–1294.
4. Rytov S. M., Kravzov Yu. A., Tatarskiy V. I. *Vvedenie v stohasticheskuyu fiziku* [Introduction to statistical radiophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 404 p.
5. Helstrom K. *Quantovaya teoriya proverki gypotez i ocenivaniya* [Quantum theory of hypothesis testing and estimation]. Moscow, Myr Publ., 1979. 344 p.
6. Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i eje prilogeniya* [Introduction to Probability Theory and Its Applications]. Moscow, Myr Publ., 1979. 640 p.
7. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funkciy i funkcional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 356 p.
8. Galuza A. A., Mazmanishvili A. S. Forma impul'sa, rasprostranyayutshegosja s neodnorodnoy nepoglotschayuschey srede [Shape of a pulse propagating in a non-uniform non-absorbing medium]. *Radiofizika i Radioastronomiya* [Radiophysics and Radio Astronomy]. 1997, vol. 2, pp. 353–358.

9. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 356 p.
10. Virchenko N. O. *Osnovni metody rozv'yazannya zadach matematychnoyi fizyky* [Basic methods of solving mathematical physics problems]. Kyiv, Volya Publ., 2006. 332 p.
11. Pirs Jh. P. *Teoriya i raschet elektronnykh potokov* [Theory and calculation of electron currents]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1956. 254 p.
12. Andrunyk V. A., Vysoc`ka V.A., Pasychnyk V. V. *Chysel`ny metody v komp'yuternykh naukah* [Numerical methods in computer science]. Lviv, Novyi svit-2000 Publ., 2018. 536 p.

Надійшла (received) 05.11.2023

UDC 51-73

O. S. MAZMANISHVILI, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"; Kharkov, Ukraine, e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>

G. YU. SYDORENKO, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of system analysis and information-analytical technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University, Associate Professor at the Department of modeling of systems and technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: annsydorenko01@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>

SIMULATION OF THE PROPAGATION OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN AN INHOMOGENEOUS NONABSORBING MEDIUM

Analytical solutions of the Ishimaru's parabolic equation for the coherence function of the electromagnetic field, which describe the temporal properties of the pulse at the output of a heterogeneous non-dissipative medium, are considered. A generalization of the approach used in the Ishimaru model to describe the time evolution of a monochromatic electromagnetic pulse enveloping in homogeneous non-dissipative media is obtained for the case of non-homogeneous non-dissipative media. Thus, an attempt was made to take into account the influence of the heterogeneity of the medium on the shape of the resulting pulse. When solving the given problem, the difficulties associated with the calculation of the continuous integral arising in the space of diffusion trajectories were overcome. This made it possible to obtain an explicit expression for the Green's function of the task and to build a computational algorithm based on which a number of numerous experiments were conducted. The analysis of the work was carried out based on the apparatus of quadratic integral functionals based on the solutions of differential stochastic equations. In the paper, the invariant temporal properties of the envelope of monochromatic electromagnetic pulses recorded after passing through a flat layer of a scattering heterogeneous medium, i.e., properties that remain unchanged when the parameters of the medium vary, in particular, the distribution of the concentration of scattering centers. The dynamics of the formation of time plumes of the scattered wave, in which the tail part is located in the peripheral time area, were analyzed. When propagating at the speed of transformation of the wave front, it reflects the appearance of the layers of the scattering region and its longitudinal shape. It is noted that the development of the proposed approximation approach to the processes affecting the time delay of electromagnetic pulses can be the accounting for the attenuation of radiation during its propagation in an inhomogeneous absorbing medium.

Keywords: electron beam, magnetron gun, electron dynamics, motion direction transformation, gradient magnetic field, control, mathematical modeling.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Мазманішвілі Олександр Сергійович, Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych

Автор 2 / Author 2: Сидоренко Ганна Юріївна, Sydorenko Ganna Yuriyivna

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.09
УДК 518.56

О. Б. АХІЗЕР, кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», завідувача кафедрою комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Olena.Akhiizer@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

О. В. ТОНІЦА, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Oleh.Tonitsa@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8498-0522>

О. А. ГЕЛЯРОВСЬКА, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Oksana.Heliarovska@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-7465>

І. В. СЕРДЮК, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Iryna.Serdiuk@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1143-9145>

М. О. АСЛАНДУКОВ, старший викладач кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: mykola.aslandukov@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8797-5817>

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕМОГРАФІЧНИХ СИТУАЦІЙ НА БАЗІ ЛАГОВИХ МОДЕЛЕЙ

Пропонується дослідження та прогнозування часових рядів на основі моделей з лагами, а також розрахунок достовірного прогнозу на основі даних про народжуваність по Україні. Економічне моделювання – це один із важливих сучасних інструментів оцінки впливу технологій на економічний сектор з метою отримання оптимального рішення. Економічні оцінки можуть ґрунтуватися на кількох різних підходах до моделювання, кожен з яких має свої сильні та слабкі сторони. Актуальність використання економіко-математичних моделей з метою вивчення демографії пов'язана з необхідністю вивчення популяційних та міграційних процесів, а також для подальшого планування та здійснення економічного та соціального розвитку країни. У кожній сфері економіки зустрічаються явища, які цікаво та важливо вивчати в їх розвитку, оскільки вони еволюціонують у часі. Ціни, економічні умови, режим протікання промислового процесу, демографічні дані мають властивість змінюватися протягом часу. Сукупність вимірювань подібного роду показників в залежності від часу представляє собою часовий ряд. Цілі вивчення часових рядів можуть бути різними. Можливо, наприклад, намагатися передбачити майбутнє на основі знань минулого, керувати процесом, який породжує ряд, намагатися з'ясувати механізм, який лежить в основі процесу, очистити ряд від компонентів, які затемнюють його динаміку, або просто стисло зробити опис характерних особливостей ряду. При вивченні взаємозв'язків між показниками або при аналізі їх розвитку в часі в якості пояснюючих змінних використовують не тільки поточне значення змінних, але й деякі попередні по часу значення, а також сам час. Моделі даного типу називаються динамічними. В економічному аналізі динамічні моделі використовуються достатньо широко. Це цілком природно, адже в багатьох випадках вплив одних економічних факторів на інші здійснюється не миттєво, а з деяким запізненням – лагом. Об'єктом дослідження роботи являється математична модель взаємозалежності векторного часового ряду «Народжуваність по Україні за січень 2005 – липень 2012 рр.» від реального доходу на душу населення. Дані вибрані досить актуально, адже без попереднього демографічного прогнозу неможливо уявити перспективи промисловості та споживання товарів та послуг, житлового будівництва, розвитку соціальної інфраструктури, охорони здоров'я та освіти, пенсійної системи та рішення геополітичних проблем.

Ключові слова: економічне моделювання, економічний аналіз, часовий ряд, лаг, динамічні моделі, популяційні та міграційні процеси.

Вступ. При підготовці та обґрунтуванні прогнозів регіонів, визначенні потреб населення в послугах освіти, охорони здоров'я, житлово-комунального господарства широко використовуються демографічні прогнози, що визначає актуальність даного дослідження. Об'єктом дослідження є демографічні процеси, а предметом дослідження – їх економіко-математичне моделювання [1], [2]. При цьому необхідно проаналізувати сутність математичної моделі та методів прогнозування на її основі, підходи до оцінки адекватності моделі, демографічні тенденції по Україні та побудувати прогнозну модель кількості населення в Україні.

Математична постановка задачі. Необхідно провести повний аналіз даних часового ряду, обрати та ідентифікувати математичну модель, та зробити прогноз по визначеній моделі. Вихідними даними є взаємозв'язані дані про народжуваність та реальний дохід по Україні. Необхідно проаналізувати структуру даних та зробити прогноз. Для цього вирішити

наступні задачі: обрати та побудувати лагову регресійну модель часового ряду, оцінити адекватність побудованої моделі, зробити прогноз демографічної ситуації.

Математична модель і методи розв'язання задачі. Ряд спостережень $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$ випадкової величини $\xi(t)$, що проаналізована, проведених в послідовні рівновіддалені моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N , називається часовим рядом. Випадкова величина $\xi(t)$ залежить від параметру t , тобто мова йде про однопараметричне сімейство випадкових величин $\{\xi(t)\}$. Це означає, що закон розподілення ймовірностей цих випадкових величин може залежати від часу t (зокрема їх перші та другі моменти часу). Основними відмінностями часового ряду від послідовності спостережень x_1, x_2, \dots, x_n , які утворюють випадкову вибірку, є члени часового ряду, які не є статистично незалежними, на відміну від елементів

© Ахізер О. Б., Тоніца О. В., Геляровська О. А., Сердюк І. В., Асландуков М. О., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПІ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



випадкової вибірки, члени часового ряду не є однаково розподіленими, тобто $P\{x(t_1) < x\} \neq P\{x(t_2) < x\}$ при $t_1 \neq t_2$. Таким чином, взаємозалежність членів часового ряду створює свою специфічну базу для побудови прогнозних значень аналізованого показника (тобто для побудови оцінок $\hat{x}(N+k)$ для невідомих значень $x(N+k)$) за спостереженими значеннями $x(1), x(2), \dots, x(N)$. Доцільно виділити основні типи факторів, під впливом яких формуються значення елементів часового ряду: довгочасові, які формують загальну тенденцію в зміні аналізованої ознаки $x(t)$, сезонні, які формують періодичні повторювальні у визначену пору року коливання аналізованої ознаки, циклічні, які формують зміни аналізованої ознаки, обумовленні діями довгочасових циклів економічної, демографічної або астрофізичної природи, а також випадкові, які не підлягають обліку та реєстрації. Їх вплив на формування значень часового ряду як раз й обумовлює стохастичну природу елементів $x(t)$. Виходячи з даних факторів, можна зробити висновки, щодо формулювання базисної цілі статистичного аналізу часового ряду $x(t)$ необхідно визначити, які з не випадкових функцій у ньому присутні, побудувати «гарні» оцінки для присутніх не випадкових функцій, підібрати модель, яка адекватно описує поведінку «випадкових залишків» $\varepsilon(t)$, та статистично оцінити параметри цієї моделі.

Успішне рішення цих задач, обумовлене базисною ціллю статистичного аналізу часового ряду, є основою для досягнення кінцевих прикладних цілей дослідження та, у першу чергу, для рішення задачі прогнозу значень часового ряду. Ряди, які зустрічаються на практиці, належать звичайно до одного із трьох видів: ряди, які проявляють свої властивості стаціонарності в спливанні довгих періодів часу; ряди, які достатньо стаціонарні в спливанні коротких періодах часу та ряди, які є явно нестационарними.

Майже всі дані в економіці представляють собою нестационарний ряд. Часовий ряд називається нестационарним, якщо хоча б одна із ймовірнісних характеристик є непостійною. Нестационарні дані, як правило, є непередбачуваними та не можуть бути змодельовані або прогнозованими. Щоб отримати послідовні, надійні результати, нестационарні дані повинні бути перетворені в стаціонарні дані, тобто необхідно усунути або відфільтрувати нестационарну частину так, щоб залишився ряд, з яким можливо працювати як зі стаціонарним.

Ряд $x(t)$ називається строго стаціонарним (стаціонарним в вузькому значенні), якщо совісне розподілення ймовірностей m спостережень $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_m)$ таке саме, як і для m спостережень $x(t_1 + \tau), x(t_2 + \tau), \dots, x(t_m + \tau)$ при будь-яких m, t_1, t_2, \dots, t_m та τ .

Інакше кажучи, властивості строго стаціонарного часового ряду не змінюються при зміні початку відліку часу. Зокрема, при $m = 1$ із припущення про строгую стаціонарність часового ряду x_t треба, щоб закон розподілу ймовірностей випадкової величини X_t не залежав від t , а виходить, не залежали від t і всі його основні числові характеристики (якщо, звичайно, вони існують), у тому числі: математичне очікування $E(X_t) = \mu$ і дисперсія $D(X_t) = \sigma^2$ [3].

Значення μ визначає постійний рівень, щодо якого коливається аналізований часовий ряд x_t , а постійна σ характеризує розмах цих коливань.

Одна з головних відмінностей послідовності спостережень, що утворюють часовий ряд, полягає в тому, що члени часового ряду є, загалом кажучи, статистично взаємозалежними. Ступінь тісноти статистичного зв'язку між випадковими величинами X_t і $X_{t+\tau}$ може бути обмірювана парним коефіцієнтом кореляції

$$\text{Corr}(X_t, X_{t+\tau}) = \frac{\text{Cov}(X_t, X_{t+\tau})}{\sqrt{D(X_t) \cdot D(X_{t+\tau})}}, \quad (1)$$

де

$$\text{Cov}(X_t, X_{t+\tau}) = E[(X_t - E(X_t))(X_{t+\tau} - E(X_{t+\tau}))]. \quad (2)$$

Якщо ряд x_t стаціонарний, то значення $\text{Corr}(X_t, X_{t+\tau})$ не залежить від t і є функцією тільки від τ ; ми будемо використовувати для нього позначення $\gamma(\tau)$:

$$\gamma(\tau) = \text{Cov}(X_t, X_{t+\tau}). \quad (3)$$

Зокрема,

$$D(X_t) = \text{Cov}(X_t, X_t) \equiv \gamma(0). \quad (4)$$

Відповідно, для стаціонарного ряду й значення коефіцієнта кореляції $\text{Corr}(X_t, X_{t+\tau})$, що залежить тільки від τ , будемо використовувати для нього позначення $\rho(\tau)$, так що

$$\rho(\tau) = \text{Corr}(X_t, X_{t+\tau}) = \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)}. \quad (5)$$

Зокрема, $\rho(0) = 1$.

Практична перевірка строгої стаціонарності ряду x_t на підставі спостереження значень x_1, x_2, \dots, x_n у загальному випадку скрутна. У зв'язку із цим під стаціонарним рядом на практиці часто мають на увазі часовий ряд x_t , у якого $E(X_t) \equiv \mu$, $D(X_t) \equiv \sigma^2$, $\text{Cov}(X_t, X_t) = \gamma(\tau)$, для будь-яких t і τ [4], [5].

Ряд, для якого виконані зазначені три умови, називають стаціонарним у широкому сенсі (слабко

стаціонарним, стаціонарним другого порядку або коваріаційно стаціонарним).

Якщо ряд є стаціонарним у широкому сенсі, він не обов'язково є строго стаціонарним. У той же час, і строго стаціонарний ряд може не бути стаціонарним у широкому сенсі просто тому, що в ньому можуть не існувати математичне очікування й/або дисперсія. (Щодо останнього прикладом може служити випадкова вибірка з розподілу Коші.) Крім того, можливі ситуації, коли зазначені три умови виконуються, але, наприклад, $E(X_t^3)$ залежить від t [6].

Ряд x_t , $t = 1, \dots, n$, називається гауссівським, якщо спільний розподіл випадкових величин X_1, \dots, X_n є n -мірним нормальним розподілом. Для гауссівського ряду поняття стаціонарності у вузькому й у широкому сенсі збігаються.

Отже, нехай x_t – стаціонарний ряд з $E(X_t) \equiv \mu$, $D(X_t) \equiv \sigma^2$, $Cov(X_t, X_1) = \gamma(\tau)$.

Оскільки в цьому випадку коефіцієнт $\rho(\tau)$ вимірює кореляцію між членами того самого часового ряду, його прийнято називати коефіцієнтом автокореляції (або просто автокореляцією).

Графік залежності $\rho(\tau)$ від τ часто називають корелограмою. Він може використовуватися для охарактеризування деяких властивостей механізму, що породжує часовий ряд. Якщо x_t – стаціонарний часовий ряд і c – деяка постійна, то часові ряди x_t і $(x_t + c)$ мають однакові корелограми [7].

Якщо припустити, що часовий ряд описується моделлю стаціонарного гауссівського процесу, то повний опис спільного розподілу випадкових величин X_1, \dots, X_n вимагає завдання $n+1$ параметрів: μ , $\gamma(0)$, $\gamma(1)$, \dots , $\gamma(n-1)$ (або μ , $\gamma(0)$, $\rho(1)$, \dots , $\rho(n-1)$)... Це набагато менше, ніж без вимоги стаціонарності, але все-таки більше, ніж кількість спостережень.

Процесом білого шуму (“білим шумом”, “чисто випадковим часовим рядом”) називають стаціонарний часовий ряд x_t , для якого $E(X_t) \equiv 0$, $D(X_t) \equiv \sigma^2 > 0$ та $\rho(\tau) = 0$ при $\tau \neq 0$.

В економіці дуже часто використовується поняття часового лага. Часто досліджувана вихідна величина змінюється не одразу після зміни значення фактору, що впливає, а через деякий час – часовий лаг.

Дистрибутивно-лагові моделі – це регресійні моделі з присутнім часовим лагом.

Загальний вигляд безкінечної дистрибутивно-лагової моделі:

$$y_t = const + \beta_0 x_t + \beta_1 x_{t-1} + \beta_2 x_{t-2} + \dots + \varepsilon_t. \quad (6)$$

Дистрибутивно-лагова модель з кінцевим лагом у k періодів:

$$y_t = const + \beta_0 x_t + \beta_1 x_{t-1} + \beta_2 x_{t-2} + \dots + \beta_k x_{t-k} + \varepsilon_t, \quad (7)$$

де t – поточний період,

x_{t-i} , $i = 1, 2, 3, \dots$ – сумарне значення фактору, що впливає у $t-1$ період,

β_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ – коефіцієнти впливу i -го часового лага,

ε_t – похибка,

β_0 – короткостроковий або впливовий мультиплікатор.

Враховуючи важливість використання дистрибутивно-лагової моделі в економіці та інших галузях життєдіяльності людини, є затребуваною адекватна оцінка параметрів такої моделі. Маємо завдання оцінити параметри α та β_0 , як найбільш значимі. Розглянемо декілька підходів, що вирішують дану проблему.

Припустимо, що x_t – не стохастичні, тоді маємо, що x_{t-i} , $i = 1, 2, 3, \dots$ також не стохастичні, тому можливо застосувати метод найменших квадратів (МНК).

Розглянемо підхід Койка. Припустимо, що коефіцієнти β_i для моделі з невизначеним лагом мають однаковий знак та змінюються за геометричною прогресією, тоді $\beta_k = \beta_0 \lambda^k$, причому $0 < \lambda < 1$ – темп спадання, і модель стає кінцевою, тобто

$$\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k = \beta_0 \left(\frac{1}{1-\lambda} \right).$$

Вплив лага на y_t з часом спадає і модель можна записати наступним чином:

$$y_t = \alpha + \beta_0 x_t + \beta_0 \lambda x_{t-1} + \beta_0 \lambda^2 x_{t-2} + \dots + \varepsilon_t. \quad (8)$$

Далі в модель вводиться затримка на один період та множиться на λ , тоді маємо:

$$\lambda y_{t-1} = \lambda \alpha + \beta_0 \lambda x_{t-1} + \beta_0 \lambda^2 x_{t-2} + \beta_0 \lambda^3 x_{t-3} + \dots + \varepsilon_t. \quad (9)$$

Віднімаючи (9) від (8), отримуємо перетворення Койка:

$$y_t = \alpha(1-\lambda) + \beta_0 x_t + \lambda y_{t-1} + v_t, \quad (10)$$

де $v_t = \varepsilon_t - \lambda \varepsilon_{t-1}$

Відмітимо деякі особливості перетворення Койка:

- Заміна безкінечної кількості параметрів на лише 3, які необхідно оцінити, тобто зникла проблема мультиколінійності.

- Модель із дистрибутивно-лагової перетворилася в авто регресійну [8].

Але оскільки модель Койка є послідовною моделлю, яка не має чіткого теоретичного обґрунтування, були запропоновані дві модифікації цієї моделі:

- Модель адаптивних очікувань, яка відображає підтвердження на практиці міркування, що наступне навчання відбувається на базі минулого досвіду, і чим старше досвід, тим його вплив менший.

- Модель часткових пристосувань, запропонована М. Нерлоу.

Дані моделі являються авторегресійними та їх можна представити у вигляді:

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_t + \alpha_2 y_{t-1} + v_t. \quad (11)$$

Для оцінки параметрів $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ можна використовувати метод найменших квадратів, тільки якщо правильним являється припущення, що стохастична незалежна величина y_{t-1} не корелює з випадковою величиною v_t [9], [10].

Основним недоліком цих методів являється припущення, що коефіцієнти β_i убувають у геометричній прогресії, що на практиці в деяких ситуаціях являється досить строгим.

Розглянемо поліноміальний лаг Альмона.

Ш. Альмоном був запропонований підхід, при якому коефіцієнти β_i згідно теоремі Вейерштраса можна апроксимувати поліномом відповідної ступені від i -величини часового лагу, тобто:

$$\beta_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_m i^m, \quad (12)$$

де m – ступінь полінома, при чому $m < k$ [6].

Підставимо (12) у кінцеву дистрибутивно-лагову модель та зробимо заміну:

$$\begin{cases} Z_{0t} = \sum_{i=0}^k x_{t-i}, \\ Z_{1t} = \sum_{i=0}^k i x_{t-i}, \\ \dots \\ Z_{mt} = \sum_{i=0}^k i^m x_{t-i}. \end{cases}$$

Отримуємо модель Альмона:

$$y_t = \alpha + a_0 Z_{0t} + a_1 Z_{1t} + a_2 Z_{2t} + \dots + a_m Z_{mt} + \varepsilon_t. \quad (13)$$

При умові, що ε_t задовольняє всім припущенням щодо класичної моделі лінійної регресії, для оцінки параметрів можна використовувати стандартний МНК. Таким чином, у відмінності від методу Койка, немає проблем, пов'язаних з присутністю залежних змінних, але є проблема мультиколінійності змінних Z_i [11].

Розглянемо деякі методи дослідження, зокрема, перевірку наявності аномальних значень та їх виключення. Попередня обробка часових рядів міститься у виявленні аномальних значень ряду. Аномальні значення часового ряду не відповідають потенціалу досліджуваної економічної системи, та їх використання для побудови трендової моделі може сильно спотворити результати, що отримуємо.

Причинами появи аномальних рівней можуть бути технічні помилки при зборі та передачі інформації. Такі помилки називаються помилками першого роду, їх можливо виявити та усунути або прийняти міри до їх не допуску. Крім того, аномальні рівні

можуть виникати через вплив факторів, які мають об'єктивний характер, але які діють епізодично. Такі помилки називаються помилками другого роду, і їх неможливо усунути, але можливо виключити з розглядання, змінив аномальне значення на середнє арифметичне двох сусідніх значень.

Для виявлення аномальних значень ряду використовують критерій Ірвіна, згідно якого аномальною вважається точка X_t , яка віддалена від попередньої точки X_{t-1} на величину, більшу середньоквадратичного відхилення:

$$\lambda_t = \frac{|X_t - X_{t-1}|}{\sigma}, \quad (14)$$

де λ_t – критерій Ірвіна,

σ – середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}.$$

Точка вважається аномальною, якщо $\lambda_t > \lambda^*$.

Табличне значення λ^* зменшується зі збільшенням довжини ряду (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення критерію Ірвіна

n	10	20	30	50	100
λ^*	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0

Розглянемо критерій Дарбіна – Уотсона. Розглядаючи послідовність залишків як часовий ряд, можливо побудувати графік їх залежності від часу. У відповідності з передумовами методу найменших квадратів залишки ε_t повинні бути випадковими. Однак при моделюванні часових рядів нерідко зустрічається ситуація, коли залишки містять у собі тенденцію або циклічні коливання. Це свідчить про те, що кожне наступне значення залишків залежить від попередніх. В цьому випадку кажуть про наявність автокореляційних залишків [12].

Існує два найбільш розповсюджених метода визначення автокореляції залишків. Перший метод – це побудова графіка залежності залишків від часу та візуальне визначення наявності або відсутності автокореляції. Другий метод – використання критерію Дарбіна – Уотсона та розрахунок наступної величини:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2}. \quad (15)$$

Таким чином, d являється відношення суми квадратів різностей послідовних значень залишків до остаточної суми квадратів по моделі регресії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На народжуваність впливає багато факторів: війни, соціальні умови, медичне обслуговування, рівень культури та освіти та ін. Але найбільш народжуваність залежить саме від добробуту сім'ї, її сукупного доходу. Саме тому в якості початкових даних для дослідження було обрано взаємозв'язані ряди: народжуваність та

реальний дохід по Україні за період січень 2005 р. – липень 2012 р. (рис. 1–2).

Виходячи з графіків, бачимо, що необхідно виділити аномальні значення для народжуваності, оскільки деякі показники ряду дуже відхиляються від сусіднього. Таким чином, отриманий ряд, представлений на рис. 3.

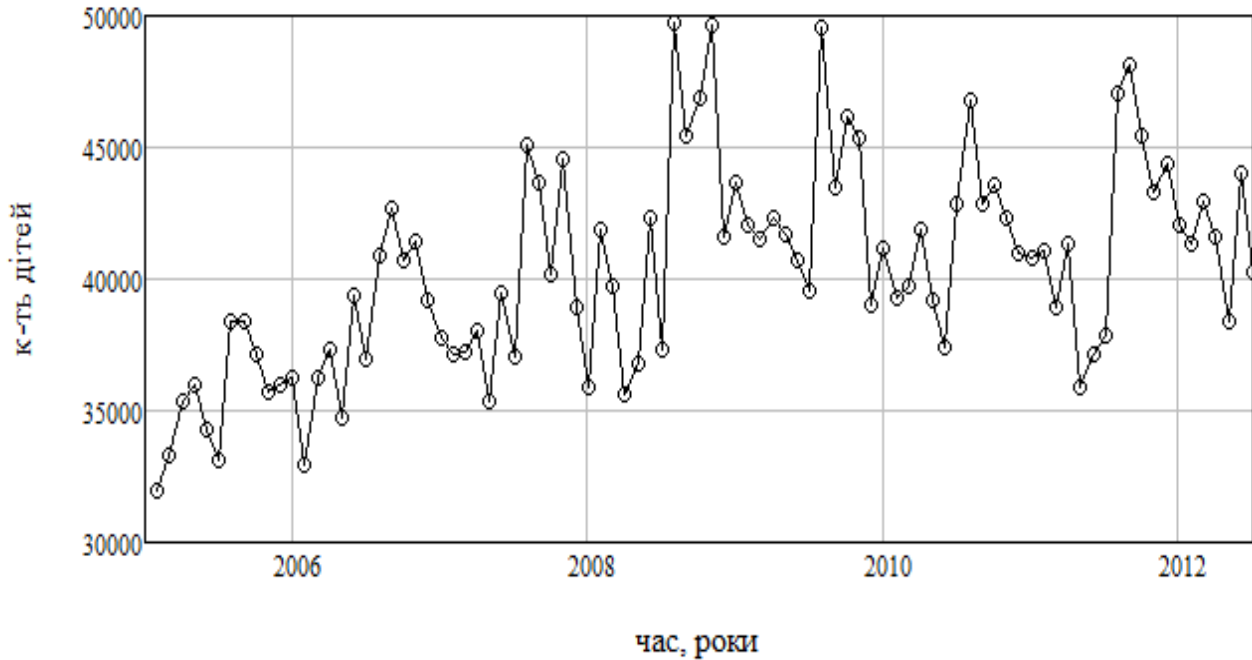


Рис. 1 Кількість народжених дітей у період 2005 – липень 2012 рр.

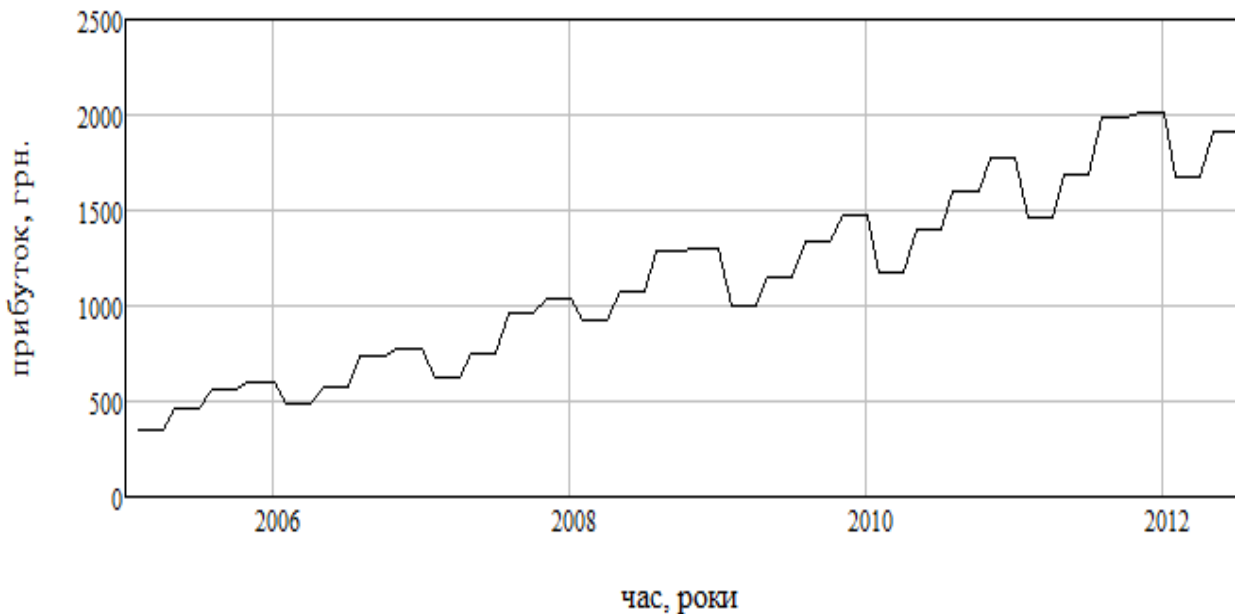


Рис. 2 Реальний дохід по Україні в період 2005 – липень 2012 рр.



Рис. 3 Вихідний ряд народжуваності, після виключення з нього аномальних значень

Розглянуто та використано на практиці методи моделювання та прогнозування часових рядів; при вивченні різних підходів для моделей з розподіленими лагами, був обраний підхід, який базується на послідовній оцінці народжуваності та були розглянуті альтернативні моделі сезонної складової. Адекватність розробленої моделі була перевірена на екзаменаційній вибірці за перше півріччя 2012 року.

Список використаної літератури

1. Руська Р. В. *Економетрика: навчальний посібник*. Тернопіль: Тайп, 2012. 224 с.
2. Волошин О. Р., Галайко Н. В. *Економетрія*. Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ, 2012. 192 с.
3. Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П., Штабалоук П. І. *Теорія ймовірностей та математична статистика*. Київ: Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П., Штабалоук П. І. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 212 с.
4. Lyubchuk L., Grinberg G., Lubchick M., Galuza A., Akhiezer O. Interval Evaluation of Stationary State Probabilities for Markov Set-Chain Models. *10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf, Germany, 2020. P. 82–85. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208932
5. Dzubenko M. I., Kolenov I. V., Pelipenko V. P., Dakhov N. F., Galuza A. A. Pulse power supply unit with microcontroller control for a laser diode array pumped erbium-ytterbium laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. Vol.79, issue 10. P. 891–902. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i10.60.
6. Гур'янова Л. С., Клебанова Т. С., Сергієнко О. А. *Економетрика: навчальний посібник для студентів напряму підготовки "Економічна кібернетика" усіх форм навчання*. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. 384 с.
7. Васильків І. М. *Основи теорії ймовірностей і математичної статистики*. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. 184 с.
8. Млавець Ю. Ю., Шаркаді М. М. *Теорія ймовірностей і математична статистика*. Ужгород: ДВНЗ «УжНУ», 2015. 48 с.
9. Гардер С. С., Корніль Т. Л. Фрактальний аналіз та прогнозування тенденції фінансового часового ряду. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 3. С. 37–40.
10. Недашківський Є. А. Теоретико-методологічні аспекти прогнозування тимчасових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 2. С. 155–160.
11. Кондратенко К. А., Гардер С. С. Прогнозування фінансового часового ряду з використанням рекурентної нейронної мережі. *XIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів НТУ «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 66–67.
12. Шапошнікова І. О. Аналіз часових рядів первинного ринку житлової нерухомості міста Києва. *Економічний вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*. Київ: КНУБА, 2018. № 36/1. С. 140–147.

References (transliterated)

1. Rus'ka R. V. *Ekonometryka: navchal'nyy posibnyk* [Econometrics: a study guide]. Ternopil', Taup Publ., 2012. 224 p.
2. Voloshyn O. R., Halayko N. V. *Ekonometriya* [Econometrics]. L'viv: L'viv's'kyu derzhavnyy universytet vnutrishnikh sprav Publ., 2012. 192 p.
3. Kushlyk-Dyvul's'ka O. I., Polishchuk N. V., Orel B. P., Shtabalyuk P. I. *Teoriya ymovirnostey ta matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. Kyiv, NTUU "KPI" Publ., 2014. 212 p.
4. Lyubchuk L., Grinberg G., Lubchick M., Galuza A., Akhiezer O. Interval Evaluation of Stationary State Probabilities for Markov Set-Chain Models. *10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf, Germany, 2020, pp. 82–85. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208932
5. Dzubenko M. I., Kolenov I. V., Pelipenko V. P., Dakhov N. F., Galuza A. A. Pulse power supply unit with microcontroller control for a laser diode array pumped erbium-ytterbium laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020, vol. 79, issue 10, pp. 891–902. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i10.60.
6. Hur'yanova L. S., Klebanova T. S., Serhiyenko O. A. *Ekonometryka: navchal'nyy posibnyk dlya studentiv napryamu pidhotovky "Ekonomiczna kibernetyka" usikh form navchannya*. [Econometrics: a basic textbook for students directly preparing "Economic Cybernetics" for all forms of learning]. Kharkiv, KhNEU im. S. Kuznetsya Publ., 2015. 384 p.
7. Vasylykiv I. M. *Osnovy teoriyi ymovirnostey i matematychnoyi statystyky* [Basics of probability theory and mathematical statistics]. L'viv, LNU im. Ivana Franka Publ., 2020. 184 p.
8. Mlavets' Yu. Yu., Sharkadi M. M. *Teoriya ymovirnostey i matematychna statystyka* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Uzhhorod, DVNZ "UzhNU" Publ., 2015. 48 p.

9. Harder C. Ye., Kornil' T. L. Fraktal'nyy analiz ta prohnozuvannya tendentsiyi finansovoho chasovoho ryadu [Fractal analysis and trend forecasting of financial time series]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI»: zb.nauk. pr. Temat. vyp.: Matematychni modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific works. Thematic issue: Mathematical modeling in engineering and technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 3, pp. 37–40.
10. Nedashkivs'kyy Ye. A. Teoretyko-metodolohichni aspekty prohnozuvannya tymchasovykh ryadiv z fraktal'nykh vlastyvostryamy na osnovi linhvistychnoho modelyuvannya [Theoretical and methodological aspects of forecasting time series with fractal properties based on linguistic modeling]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky* [Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series: technical sciences]. 2019, no. 2, pp. 155–160.
11. Kondratenko K. A., Harder S. Ye. Prohnozuvannya finansovoho chasovoho ryadu z vykorystanniam rekurentnoyi neyronnoyi merezhi [Financial time series forecasting using a recurrent neural network]. *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya mahistrantiv ta aspirantiv NTU "KhPI"* [XIII International scientific and practical conference of master's and postgraduate students of NTU "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, pp. 66–67.
12. Shaposhnikova I. O. Analiz chasovykh ryadiv pervynnoho rynku zhytlovyoi nerukhomosti mista Kyyyeva [Analysis of time series of the primary market of residential real estate in Kyiv]. *Ekonomichnyy visnyk Kyyyivs'koho natsional'noho universytetu budivnytstva i arkhitektury* [Economic Bulletin of the Kyiv National University of Construction and Architecture]. Kyyyiv, KNUBA Publ., 2018, no. 36/1, pp. 140–147.

Надійшла (received) 01.12.2023

UDC 518.56

O. B. AHIEZER, Candidate of Technical Sciences, Professor of NTU "KhPI", Head of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Olena.Akhiezer@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

O. V. TONITSA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Oleh.Tonitsa@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8498-0522>

O. A. GELYAROVSKA, Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Oksana.Heliarovska@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-7465>

I. V. SERDYUK, Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Oksana.Iryna.Serdiuk @kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1143-9145>

M. O. ASLANDUKOV, Senior Lecturer at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: mykola.aslandukov@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8797-5817>

ADVANCED DEMOGRAPHIC SITUATIONS BASED ON LAG MODELS

Research and forecasting of time series based on models with lags is offered, as well as calculation of a reliable forecast based on data on birth rates in Ukraine. Economic modeling is one of the important modern tools for assessing the impact of technologies on the economic sector in order to obtain an optimal solution. Economic evaluations can be based on several different modeling approaches, each with its own strengths and weaknesses. The relevance of the use of economic and mathematical models for the purpose of studying demography is connected with the need to study population and migration processes, as well as for further planning and implementation of the country's economic and social development. In every sphere of the economy, there are phenomena that are interesting and important to study in their development, as they evolve over time. Prices, economic conditions, industrial processes, and demographic data tend to change over time. The set of measurements of this kind of indicators depending on time is a time series. The goals of studying time series can be different. It is possible, for example, to try to predict the future on the basis of knowledge of the past, to control the process that generates the series, to try to find out the mechanism underlying the process, to clear the series of components that obscure its dynamics, or simply to briefly describe the characteristic features of the series. When studying the relationships between indicators or when analyzing their development over time, not only the current value of the variables, but also some previous values in time, as well as time itself, are used as explanatory variables. Models of this type are called dynamic. In economic analysis, dynamic models are used quite widely. This is quite natural, because in many cases the influence of some economic factors on others is not carried out immediately, but with some delay – a lag. The object of research is the mathematical model of the interdependence of the vector time series "Births in Ukraine for January 2005 – July 2012." The data are chosen quite relevantly, because without a preliminary demographic forecast it is impossible to imagine the prospects of industry and consumption of goods and services, housing construction, development of social infrastructure, health care and education, pension system and solutions to geopolitical problems.

Keywords: economic modeling, economic analysis, time series, lag, dynamic models, population and migration processes.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Ахієзер Олена Борисівна, Ahiezer Olena Borysivna

Автор 2 / Author 2: Тоніца Олег Володимирович, Tonitsa Oleg Volodimirovych

Автор 3 / Author 3: Гелярзовська Оксана Анатоліївна, Gelyarovska Oksana Anatoliivna

Автор 4 / Author 4: Сердюк Ірина Василівна, Serdyuk Irina Vasilivna

Автор 5 / Author 5: Асландуков Микола Олексійович, Aslandukov Mykola Oleksiyovych

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

INFORMATION TECHNOLOGY

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.10

УДК 004.627

Я. М. КЛЯТЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: y.kliatchenko@kpi.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4236-4059>

В. В. ГОЛУБ, студент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: holub.volodymyr@iit.kpi.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДИФІКАЦІЇ АЛГОРИТМУ УЩІЛЬНЕННЯ ДАНИХ БЕЗ ВТРАТ

Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій обумовлює стрімке збільшення обсягів інформації, що зберігається, передається та оброблюється в комп'ютерних системах. Забезпечення повноцінного та ефективного використання цієї інформації вимагає застосування новітніх удосконалених алгоритмів для ущільнення та оптимізації її зберігання. Подальше зростання технічного рівня апаратних та програмних засобів тісно пов'язано з проблемами нестачі пам'яті для зберігання, що, також, актуалізує задачу ефективної компресії даних. Покращені алгоритми стиснення дозволяють ефективніше використовувати ресурси для зберігання та зменшують час пересилання даних через мережу. Щороку програмісти, вчені та науковці шукають способи удосконалення існуючих алгоритмів, а також винаходять нові, оскільки кожен алгоритм, навіть якщо він є простим, має свій потенціал удосконалення. Широке коло технологій, пов'язаних зі збором, обробкою, зберіганням і передачею інформації, значною мірою орієнтується на розвиток систем, в яких графічне подання інформації має перевагу над іншими типами представлення. Розвиток сучасних комп'ютерних систем і мереж вплинув на широке розповсюдження засобів, що оперують цифровими зображеннями. Зрозуміло, що зберігання і передача великої кількості зображень у первісному, необробленому вигляді є досить затратною по ресурсам задачею. В свою чергу сучасні мультимедійні системи набули значної популярності завдяки, насамперед, ефективним засобам компресії графічної інформації. Стиснення зображень є ключовим чинником для підвищення ефективності передачі даних та використання обчислювальних ресурсів. Робота присвячена дослідженню модифікації алгоритму стиснення даних The Quite OK Image Format, або QOI, що оптимізовано за швидкодією для стиснення графічної інформації. Тестування тих реалізацій алгоритму, які були запропоновані його автором, демонструє такі обнадійливі результати, що можуть зробити його конкурентоспроможним щодо вже відомого алгоритму PNG, забезпечуючи більшу швидкодію стиснення та націленість на роботу з архівами. В статті проведено порівняння результатів роботи двох запропонованих модифікацій алгоритму з оригінальною реалізацією та показано їхні переваги. Оцінено ефективність модифікацій та особливості їхнього застосування для різних випадків. Також проведено порівняння коефіцієнтів стиснення файлів, що були ущільнені оригінальним алгоритмом QOI з такими коефіцієнтами, які було отримано в результаті застосування модифікацій його початкової версії.

Ключові слова: стиснення даних, алгоритм QOI, модифікація алгоритму, ущільнення даних без втрат.

Вступ. Прогрес в галузі технічних засобів відтворення, передачі і зберігання інформації не встигає за потребами людства, і тому важливо ефективно використовувати наявні засоби зберігання і передачі інформації. Одним із чинників, що це забезпечує, може бути ефективна подача наявної інформації з використанням ущільнення (компресії) даних без втрат [1].

Значний потік інформації споживачі мультимедіа контенту отримують завдяки мережі Інтернет, переглядаючи вебсайти [2]. Для більшої наочності, доступності та розуміння змісту таких сайтів, часто ця інформація супроводжується графічними зображеннями, які підкреслюють чи висвітлюють основну її суть [3]. Зображення є таким типом інформації, що в недалекому минулому могло поступитися популярністю тільки

текстовим даним, але завдяки можливостям сучасних мультимедійних засобів ця популярність вже давно перевершила символічне подання інформації.

Мультимедійні засоби дозволяють ефективно вирішити широкий спектр завдань – ми зустрічаємо їх коли починаємо роботу з комп'ютером, відкриваємо будь-яку програму, натрапляємо на піктограми, що теж є видом графіки. Протягом доби робиться незліченна кількість фотографій, якими діляться з колегами, друзями, які публікуються в соцмережах тощо [4]. Характеристики фотографій, якість передачі кольору, розміри зображень, їх розширення покращуються для відображення об'єктів ближче до природніх, щоб точно передати їх сутність [5]. З одного боку це

© Клятченко Я. М., Голуб В. В., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



покращує сприйняття людиною картини, але з підвищенням якості фото зростає і вміст надлишкової інформації, яка є небажаною з точки зору зберігання, обробки та пересиланням зображення між комп'ютерними засобами. Надлишковість впливає на швидкість передачі даних по мережі та використання ресурсів мережі [6].

Для боротьби з надлишковістю або зменшення розміру того чи іншого типу файлів, використовують алгоритми стиснення зображення [7]. Завдяки стисненню даних можемо отримати файли меншого розміру, а отже і скоротити час передачі таких даних та звільнити додаткове місце на пристрої для зберігання. Це дозволяє оптимізувати простір для зберігання та навантаження на мережу.

Проблема стиснення зображень завжди буде актуальною та потребуватиме удосконалення. Популярні алгоритми стиснення, які набули широкого застосування сьогодні, були винайдені десятки років тому. Багато з них вже були неодноразово модифіковані та покращені для використання із обмеженим колом типів зображень. Попри це, пошук єдиного універсального алгоритму стиснення ще триває. Кожного року завдяки розробникам програмного забезпечення ми отримуємо нові алгоритми стиснення, які ще потрібно удосконалити та перевірити їх ефективність на практиці [8]. З часом, можливо, вони замінять поширені нині алгоритми. У даній статті пропонується розглянути та оцінити ефективність модифікацій відносно нового алгоритму стиснення зображень QOI, який створив Домінік Щаблевські [9].

Постановка задачі. Задача полягає в розробці удосконаленого алгоритму стиснення даних без втрат, що має покращити результати існуючого алгоритму [9], а також проведення порівняння оригінального алгоритму із модифікованими версіями та із популярними форматами.

Опис алгоритму QOI. Алгоритм QOI стискає зображення за один прохід по всіх пікселях зображення [10].

Основні складові :

- Заголовок – 14 байтів
- Тіло (будь яка кількість фрагментів даних), розмір фрагментів - кратне 8 бітам

- Заключний маркер

Структура заголовку:

- char magic; – “магічні” байти “qoif”;
- uint32_t width; – ширина зображення в пікселях,
- uint32_t height; – висота зображення в пікселях,
- char magic; – “магічні” байти “qoif”;
- int8_t channels; – 3 = RGB, або 4 = RGBA,
- uint8_t colorspace; – 0 = sRGB з лінійною альфою ; 1 = всі канали лінійні,
- channels та colorspace – тільки інформативні поля.

На початку роботи алгоритм визначає наявність чи відсутність альфа-каналу. В залежності від цього

використовується один із варіантів кодування піксельних послідовностей (фрагменту) [11].

Якщо альфа-канал присутній, то фрагмент QOI_OP_RGBA кодується як показано на рис. 1.

QOI_OP_RGBA																			
Byte[0]								Byte[1]		Byte[2]		Byte[3]		Byte[4]					
7	6	5	4	3	2	1	0	7	..	0	7	..	0	7	..	0			
1	1	1	1	1	1	1	1	red			green			blue			alpha		

Рис. 1 – Фрагмент QOI_OP_RGBA

Без альфа каналу фрагмент QOI_OP_RGB кодується як на рис.2.

QOI_OP_RGB																
Byte[0]								Byte[1]		Byte[2]		Byte[3]				
7	6	5	4	3	2	1	0	7	..	0	7	..	0	7	..	0
1	1	1	1	1	1	1	0	red			green			blue		

Рис. 2 – Фрагмент QOI_OP_RGB

Проходячи по пікселях, алгоритм може кодувати поточний піксель одним із чотирьох варіантів. Також, під час проходження по поточних пікселях зображення в проміжному масиві завжди зберігається 64 попередньо пройдених значень пікселів.

Для першого варіанту перевіряється значення кольору поточного пікселя. Якщо воно дорівнює значенню попереднього пікселя зображення, то при цьому збільшується значення змінної пройденої довжини зображення – змінну run збільшуємо на одиницю та переходимо до наступного пікселя. Таку послідовність дій виконуємо до тих пір, поки поточний піксель не буде відрізнитися від попереднього. Після знаходження чергової відмінності від попередніх пікселів, у фрагмент QOI_OP_RUN заноситься значення run – кількість повторів у бітовому представленні (рис.3).

QOI_OP_RUN										
Byte[0]										
7	6	5	4	3	2	1	0			
1	1									run

Рис. 3 – Фрагмент QOI_OP_RUN

Другий варіант. Перевіряється попередні 64 пікселя, і в разі знаходження співпадіння у фрагмент QOI_OP_INDEX заноситься індекс пікселя з буфера (рис.4).

QOI_OP_INDEX										
Byte[0]										
7	6	5	4	3	2	1	0			
0	0									index

Рис.4 – Фрагмент QOI_OP_INDEX

Третій варіант. Оскільки у більшості випадків різниця між попереднім і поточним значенням пікселів

невелика, то фрагмент дорівнюватиме різниці по модулю 255 (8-бітний канал) між поточним пікселем і попереднім (рис. 5).

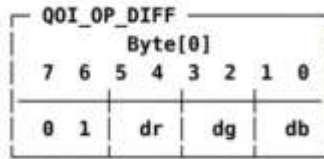


Рис. 5 – Фрагмент QOI_OP_DIFF

Також можливим варіантом фрагменту є QOI_OP_LUMA (див. рис. 6). Він представляє собою різницю між поточним пікселем і попереднім, в даному прикладі різниця по зеленому каналу використовується як базова різниця для інших кольорів. Цей метод, як було доведено, збільшує ступінь стиснення в тестах бенчмарку.

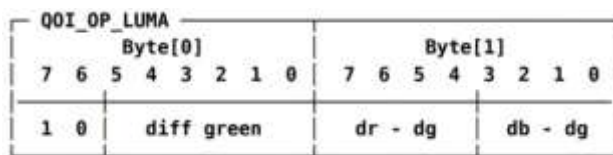


Рис. 6 – Фрагмент QOI_OP_LUMA

Четвертий варіант. У випадку, коли жоден із попередніх варіантів не підходить, запам'ятовується останнє значення без змін та переходимо до наступного пікселя і виконуємо одну із чотирьох можливий дій.

Для запам'ятовування всієї інформації використовується фрагмент QOI_OP_RGB (див. рис.2) або QOI_OP_RGBA (див. рис. 1).

Модифікації алгоритму QOI. Для початку модифікації алгоритму визначимо ключові елементи алгоритму (буфер, або те, як кодуються символи тощо) та проведемо аналіз можливості модифікації кожного елемента окремо чи разом із іншими.

У алгоритмі стиснення QOI можемо виділити такі етапи:

- Буфер із попередніми значеннями 64 пройдених пікселів.
- Чотири методи кодування пікселів:
 1. Запам'ятовування, якщо поточний піксель дорівнює попередньому (QOI_OP_RUN),
 2. Запам'ятати різницю значень колірної моделі по попереднім пікселям(QOI_OP_DIFF або QOI_OP_LUMA),
 3. Віднайти індекс такого ж пікселя у буфері пройдених пікселів(QOI_OP_INDEX),
 4. Записати оригінальні значення колірної моделі поточного пікселя (QOI_OP_RGB або QOI_OP_RGBA).

Кожен із методів кодування записується у фрагменти. Розмір одного фрагменту залежить від його типу (табл. 1).

Для того, щоб вірно розкодувати ущільнене зображення, всі фрагменти мають свої теги, або краще сказати, біти-ідентифікатори.

Ідентифікація фрагментів QOI_OP_RGBA та QOI_OP_RGB особлива, їх можна ідентифікувати,

коли значення байту дорівнює 11111111 або 11111110 відповідно. Інші фрагменти ідентифікуються тільки по двом старшим бітам, оскільки цього достатньо тому, що всього лишається 4 види фрагментів (для множини варіацій значень двох бітів цілком достатньо).

Таблиця 1 – Таблиця розміру кожного із фрагментів, які містить алгоритм QOI.

Назва	Довжина
QOI_OP_RUN	1 байт
QOI_OP_DIFF	1 байт
QOI_OP_LUMA	2 байти
QOI_OP_INDEX	1 байт
QOI_OP_RGBA	5 байтів
QOI_OP_RGB	4 байти

Зауважимо, що внаслідок особливості ідентифікації фрагментів QOI_OP_RGBA та QOI_OP_RGB, для фрагменту QOI_OP_RUN існують обмеження. Ці обмеження пов'язані з тим, що для ідентифікації фрагменту QOI_OP_RUN два старших біта встановлюються в 1, а решта 6 бітів використовуються для запам'ятовування кількості повторів. І якщо у нас повторів буде 62 або 63, у бітовому представленні це виглядає як 1111110 або 111111 відповідно і до цих значень потрібно ще додати старші біти, які дорівнюють 11. У результаті матимемо двійкові значення для QOI_OP_RGB і QOI_OP_RGBA. Під час модифікації потрібно враховувати таку особливість, щоб уникнути помилок при декодуванні.

Модифікація фрагменту QOI_OP_INDEX. Візьмемо до уваги QOI_OP_INDEX, довжина якого вісім бітів, два з яких відносять до заголовку і шість бітів на запам'ятовування (64 різних значень). Хеш-функція для визначення індексу позиції [12] виглядає як:

$$index = (r * 3 + g * 5 + b * 7 + a * 11) \% 64$$

Після ознайомлення з ключовими етапами алгоритму, розглянемо можливість зміни довжини буферу пройдених пікселів. Розглянемо одну із ситуацій, коли, наприклад, у нас після проходження є 80 відмінних між собою пікселів. Припустимо, що ми знаходимо піксель, який був 14-м пікселем із пройдених 80 пікселів. Дана ситуація не підходить до жодного із попередніх варіантів кодування, окрім варіанту запису значень колірної моделі без змін у фрагменти QOI_OP_RGBA або QOI_OP_RGB. У такій ситуації було б зручно мати більший буфер пройдених пікселів, що дає вигреш від трьох до чотирьох байтів. Враховуючи те, що сучасні зображення мають доволі великі розміри – наприклад, зображення розміром 2 560 × 1 280 пікселів містить в собі 3 276 800 пікселів. З цього випливає, що вищезгадана ситуація цілком можлива і при більше ніж трьох мільйонах пікселів може зустрітись часто. У такій ситуації три або чотири байти різниці можуть зіграти вирішальну роль, вплинувши позитивно на вихідний розмір зображення.

Для того, щоб збільшити розмір буфера, потрібно збільшити розмір фрагменту `QOI_OP_INDEX` (див. рис. 4) з 1 байту до 2 байт. При збільшенні розміру фрагменту потрібно врахувати те, що треба зменшити можливий вибух у розмірі з трьох–чотирьох до двох–трьох байтів. Кількість вибухних байтів залежить від типу зображення, та від того чи містить він альфа-канал чи ні. Для цього випадку максимально можливе значення індексу дорівнює 16384 (нагадуємо, що для попереднього варіанту максимальна кількість символів не перевищувала 64).

Після зміни довжини буфера, потрібно змінити хеш-функцію, яка записує індекс i в залежності від значення $R\ G\ B$ видавала лише одне відповідне значення індексу буфера. Щоб переробити функцію так, щоб використовувались цілочисельні коефіцієнти потрібно знайти такі значення коефіцієнтів r, g, b та a , щоб вони були цілими числами і за можливості були найменшими спільними множниками для коефіцієнтів 3, 5, 7 і 11. Найменший спільний множник для цих чисел дорівнює 1 155. Отже, будемо використовувати коефіцієнти, рівні 1 155, 2 310, 8 085 і 12 615 відповідно. Хеш-функція для визначення індексу матиме вигляд:

$$index = (r * 1155 + g * 2310 + b * 8085 + a * 12615) \% 16384.$$

Модифікація фрагменту `QOI_OP_RUN`. Розглянемо інший варіант – фрагмент `QOI_OP_RUN`. Він фіксує кількість повторів попереднього пікселя. Отже, якщо у нас виникне ситуація, коли буде знайдено більше, ніж 62 однакових пікселя підряд, то для наступного пікселя потрібно буде використати один із 3 інших варіантів. Наступний піксель теж буде закодовано за допомогою фрагменту `QOI_OP_RUN`. Внаслідок чого

отримаємо 3 байти інформації. І для кожних наступних 62 однакових пікселів цей варіант буде додавати 2 байти.

Далі знову збільшимо довжину фрагмента на 8 біт. Так можна закодувати до 15 872 однакових пікселів, враховуючи обмеження: що у 16-бітовому числі в старших бітах не можна використовувати комбінації, що дорівнюють значенням 255 та 254 відповідно. Застосовуючи такий прийом можна виграти декілька десятків, а, можливо, сотень байт.

Оскільки в більшості зображень важко зустріти ситуацію, коли однакових пікселів буде більше 62 поспіль, то зручним варіантом було б те, щоб фрагмент `QOI_OP_RUN` був адаптивним. Адаптивність має полягати в тому, що у випадку, якщо кількість повторюваних символів більше ніж 62, то потрібно використовувати збільшений фрагмент `QOI_RUN_OP`. Якщо ця кількість менша, то використовується звичайний фрагмент розміром в один байт. Таку реалізацію не можна відкидати, але в такому разі потрібно вводити новий тип фрагменту, що спричинить появу нового ідентифікатора. У поточному стані всі чотири фрагменти кодуються набором із 2 біт, а якщо буде введено п'ятий фрагмент, то потрібно додавати ще один біт до варіацій і така зміна вплине на весь алгоритм. Таким чином це недоцільно для алгоритму.

Інші фрагменти змінити складно тому, що в них міститься інформація про колір і вона залежить від поточного або попереднього значення пікселя.

На рис. 7 показано скріншот результату порівняння стиснення фалів із розширенням `qoi` та `png` [12] в `zip`-архіві.

Результати стиснення одноколірного зображення представлені в табл. 2.

Ім'я	Тип	Розмір стиснутого файлу	Розмір	Коефіцієнт стиснення
amazon.com	Файл PNG	6 166 КБ	6 232 КБ	2%
amazon.qoi	Файл QOI	3 886 КБ	5 019 КБ	23%
amazon_run.qoi	Файл QOI	3 938 КБ	5 216 КБ	25%
amazonindex.qoi	Файл QOI	4 195 КБ	5 303 КБ	21%
apple.com	Файл PNG	2 246 КБ	2 306 КБ	3%
apple.qoi	Файл QOI	1 518 КБ	2 104 КБ	28%
apple_run.qoi	Файл QOI	1 541 КБ	2 189 КБ	30%
appleindex.qoi	Файл QOI	1 630 КБ	2 287 КБ	29%
cnn.com	Файл PNG	2 590 КБ	2 685 КБ	4%
cnn.qoi	Файл QOI	1 528 КБ	2 302 КБ	34%
cnn_run.qoi	Файл QOI	1 547 КБ	2 343 КБ	34%
cnnindex.qoi	Файл QOI	1 536 КБ	2 330 КБ	35%
creativecommons.org	Файл PNG	6 102 КБ	6 146 КБ	1%
creativecommons.qoi	Файл QOI	3 943 КБ	4 908 КБ	20%
creativecommons_run.qoi	Файл QOI	4 003 КБ	5 120 КБ	22%
creativecommonsindex.qoi	Файл QOI	4 176 КБ	5 275 КБ	21%

Рис. 7 – Порівняння стиснення фалів із розширенням `qoi` та `png` у `zip`-архіві

Таблиця 2 – Результат стиснення одноколірного зображення

Модифікація алгоритму	Зображення	Розмір, байт	Стиснутий розмір, байти	Відсоток стиснення	Час стиснення, секунди	Час декодування, секунди
ORIGINAL	black_1920_1080	8 294 457	367 46	99,56	5,78	4,35
RUN	black_1920_1080	8 294 457	383	100,00	5,82	4,48
INDEX	black_1920_1080	8 294 457	367 46	99,56	5,80	4,61

Таблиця 3 – Результати стиснення зображення із розміром 1 313 × 6 097

Модифікація алгоритму	Зображення	Розмір, байт	Стиснутий розмір, байти	Відсоток стиснення	Час стиснення, секунди	Час декодування, секунди
ORIGINAL	amazon	32 021 501	5 169 981	83,85	32,91	22,86
RUN	amazon	32 021 501	5 816 227	81,84	31,82	23,09
INDEX	amazon	32 021 501	5 816 227	81,84	32,10	24,39

Результати стиснення зображення із розміром 1 313 × 6 097 наведені в табл. 3.

Висновки. Проаналізувавши отримані результати, можна зробити наступні висновки :

- Модифіковані алгоритми QOI не завжди дають покращення показників стиснення.

- Якщо порівнювати оригінальний алгоритм QOI та дві його модифікації, то можна зробити висновок, що модифікація QOI зі збільшенням буферу для запам'ятовування пройдених пікселів значно програє модифікації QOI, в якій ми розширювали фрагмент QOI_OP_RUN.

- Алгоритм із модифікацією фрагменту QOI_OP_RUN можна використовувати замість оригінального алгоритму. Оскільки різниця в часі кодування, декодування, та вихідним розміром стиснутого зображення практично однакова, в випадках коли зображення має більше, ніж 62 однакових пікселя підряд, він виграє порівняно із оригінальним алгоритмом.

- У випадку порівняння алгоритмів PNG та QOI при стисненні зображення, що представляє собою скріншот екрану, то перший програє всім модифікаціям QOI та оригінальному алгоритму QOI, на що вказують наведені вище результати тестів.

Список використаної літератури

1. Fu S., Wang L., Cheng Y., Chen, G. Intelligent compression for synchrotron radiation source image. *25th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 2021. Вип. 251. С. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125103073>.
2. Шкіль Л. 63% людей зараз онлайн. Великий звіт Digital 2022 про користувачів інтернету. URL: <https://ain.ua/2022/04/30/zvit-digital-2022/> (дата звернення: 13.11.2023).
3. *Use images and media to enhance understanding*. URL: <https://accessibility.huit.harvard.edu/use-images-and-media-enhance-understanding> (дата звернення: 12.11.2023).
4. Піктер Ф. *Smartphones Cause Photography Boo*. URL: <https://www.statista.com/chart/10913/number-of-photos-taken-worldwide> (дата звернення: 13.11.2023).
5. *Характеристики зображення та засобів його відтворення*. URL: <https://library.vpuhlukhiv.com.ua/subjects:basic:informatika>

graph:k%D0%B0r%D0%B0kterystyky_zobr%D0%B0zhennia_t%D0%B0_z%D0%B0sobiv_ioho_vidtvorennia (Дата звернення: 13.11.2023).

6. *What are different types of redundancies in digital image? Explain in detail*. URL: <https://www.ques10.com/p/7293/what-are-different-types-of-redundancies-in-digi-1> (дата звернення: 13.11.2023).
7. *Compression algorithms*. URL: <https://www.prepressure.com/library/compression-algorithm> (дата звернення: 02.11.2023).
8. *WebP*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WebP> (дата звернення: 13.11.2023).
9. Szablewski D. *The Quite OK Image Format for Fast, Lossless Compression*. URL: <https://qoiformat.org/> (дата звернення: 1.11.2023).
10. Szablewski D. *QOI - The Quite OK Image Format*. URL: <https://qoiformat.org/benchmark> (дата звернення: 7.11.2023).
11. Szablewski D. *QOI-Specification*. URL: <https://qoiformat.org/qoi-specification.pdf> (дата звернення: 25.10.2023).
12. *Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition)*. URL: <http://www.w3.org/TR/PNG/> (дата звернення 8.11.2023).

References (transliterated)

1. Fu S., Wang L., Cheng Y., Chen G. Intelligent compression for synchrotron radiation source image. *25th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 2021. vol. 251 pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125103073>.
2. Skil L. 63% liudei zaraz onlain. Velykyi zvit Digital 2022 pro korystuvachiv internetu. Available at: <https://ain.ua/2022/04/30/zvit-digital-2022/> (accessed 13.11.2023).
3. *Use images and media to enhance understanding*. Available at: <https://accessibility.huit.harvard.edu/use-images-and-media-enhance-understanding> (accessed: 12.11.2023).
4. Richter F. *Smartphones Cause Photography*. Available at: <https://www.statista.com/chart/10913/number-of-photos-taken-worldwide> (accessed: 13.11.2023).
5. *Kharakterystyky zobrazhennia ta zasobiv yoho vidtvorennia*. Available at: https://library.vpuhlukhiv.com.ua/subjects:basic:informatika:graph:k%D0%B0r%D0%B0kterystyky_zobr%D0%B0zhennia_t%D0%B0_z%D0%B0sobiv_ioho_vidtvorennia (accessed: 13.11.2023).
6. *What are different types of redundancies in digital image? Explain in detail*. Available at: <https://www.ques10.com/p/7293/what-are-different-types-of-edundancies-in-digi-1> (accessed: 13.11.2023).
7. *Compression algorithms*. Available at: <https://www.prepressure.com/library/compression-algorithm> accessed: 02.11.2023).
8. *WebP*. Available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WebP> (accessed: 13.11.2023).

9. Szablewski D. *The Quite OK Image Format for Fast, Lossless Compression*. Available at: <https://qoiformat.org> (accessed: 1.11.2023).
10. Szablewski D. *QOI - The Quite OK Image Format*. Available at: <https://qoiformat.org/benchmark> (accessed: 7.11.2023).
11. Szablewski D. *QOI-Specification*. Available at: <https://qoiformat.org/qoi-specification.pdf> (accessed: 25.10.2023).
12. *Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition)*. Available at: <http://www.w3.org/TR/PNG/> (accessed: 8.11.2023).

Надійшла (received) 17.11.2023

UDC 004.627

Y. M. KLYATCHENKO, PhD, associate professor of Department of System Programming and Specialized Computer Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Kyiv, Ukraine, e-mail: y.kliatchenko@kpi.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4236-4059>

V. V. HOLUB, student of Department of System Programming and Specialized Computer Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Kyiv, Ukraine, e-mail: holub.volodymyr@i11.kpi.ua

EFFICIENCY OF LOSSLESS DATA COMPRESSION ALGORITHM MODIFICATION

The current level of development of information technologies causes a rapid increase in the amount of information stored, transmitted and processed in computer systems. Ensuring the full and effective use of this information requires the use of the latest improved algorithms for compaction and optimization of its storage. The further growth of the technical level of hardware and software is closely related to the problems of lack of memory for storage, which also actualizes the task of effective data compression. Improved compression algorithms allow more efficient use of storage resources and reduce data transfer time over the network. Every year, programmers, scientists, and researchers look for ways to improve existing algorithms, as well as invent new ones, because every algorithm, even if it is simple, has its potential for improvement. A wide range of technologies related to the collection, processing, storage and transmission of information are largely oriented towards the development of systems in which graphical presentation of information has an advantage over other types of presentation. The development of modern computer systems and networks has influenced the wide distribution of tools operating with digital images. It is clear that storing and transferring a large number of images in their original, unprocessed form is a rather resource-intensive task. In turn, modern multimedia systems have gained considerable popularity thanks, first of all, to effective means of compressing graphic information. Image compression is a key factor in improving the efficiency of data transfer and the use of computing resources. The work is devoted to the study of the modification of the data compression algorithm The Quite OK Image Format, or QOI, which is optimized for speed for the compression of graphic information. Testing of those implementations of the algorithm, which were proposed by its author, shows such encouraging results that it can make it competitive with the already known PNG algorithm, providing a higher compression speed and targeting work with archives. The article compares the results of the two proposed modifications of the algorithm with the original implementation and shows their advantages. The effectiveness of the modifications and the features of their application for various cases were evaluated. A comparison of file compression coefficients, which were compressed by the original QOI algorithm, with such coefficients, which were obtained as a result of the application of modifications of its initial version, was also carried out.

Keywords: data compression, QOI algorithm, algorithm modification, lossless data compression.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Клятченко Ярослав Михайлович, Klyatchenko Yaroslav Mykhailovich

Автор 2 / Author 2: Голуб Володимир Володимирович, Holub Volodymyr Volodymyrovych

A. K. DREMOV, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student of the Computer Engineering Department of the faculty of Informatics and Computer Science, Kyiv, Ukraine, e-mail: a.k.dremov@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0009-0005-7214-9458>

METHODS AND MEANS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF NETWORK TRAFFIC SECURITY MONITORING BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This paper aims to provide a solution for malicious network traffic detection and categorization. Remote attacks on computer systems are becoming more common and more dangerous nowadays. This is due to several factors, some of which are as follows: first of all, the usage of computer networks and network infrastructure overall is on the rise, with tools such as messengers, email, and so on. Second, alongside increased usage, the amount of sensitive information being transmitted over networks has also grown. Third, the usage of computer networks for complex systems, such as grid and cloud computing, as well as IoT and "smart" locations (e.g., "smart city") has also seen an increase. Detecting malicious network traffic is the first step in defending against a remote attack. Historically, this was handled by a variety of algorithms, including machine learning algorithms such as clustering. However, these algorithms require a large amount of sample data to be effective against a given attack. This means that defending against zero-day attacks or attacks with high variance in input data proves difficult for such algorithms. In this paper, we propose a semi-supervised generative adversarial network (GAN) to train a discriminator model to categorize malicious traffic as well as identify malicious and non-malicious traffic. The proposed solution consists of a GAN generator that creates tabular data representing network traffic from a remote attack and a classifier deep neural network for said traffic. The main goal is to achieve accurate categorization of malicious traffic with a few labeled examples. This can also, in theory, improve classification accuracy compared to fully supervised models. It may also improve the model's performance against completely new types of attacks. The resulting model shows a prediction accuracy of 91 %, which is lower than a conventional deep learning model; however, this accuracy is achieved with a small sample of data (under 1000 labeled examples). As such, the results of this research may be used to improve computer system security, for example, by using dynamic firewall rule adjustments based on the results of incoming traffic classification. The proposed model was implemented and tested in the Python programming language and the TensorFlow framework. The dataset used for testing is the NSL-KDD dataset.

Keywords: cybersecurity, network security, malicious traffic identification, machine learning, generational adversarial networks, semi-supervised learning.

Introduction. Computer networks are a key part of modern digital communications. However, these networks can be susceptible to malicious network traffic and various attacks. These attacks can be categorized by specific packet information used in them, such as the source address, service and port used, protocol used, etc. As such, network intrusion and attack detection play an important part in identifying an attack and counteracting it and are relevant areas of research.

Additionally, modern machine learning methods and algorithms can be used to categorize data or objects with great precision, provided there is a large enough training sample. A variety of statistical analysis methods are used to categorize the data. These include data clustering, which attempts to group data points based on their similarity to each other. A well-known example of such an approach is k -means clustering, which attempts to assign N data points to K clusters. A variation of this algorithm called k -nearest neighbors is often used for classification problems. However, accurate clustering often requires a large number of data points. Another common machine learning algorithm approach is supervised learning, for example, using a decision tree classifier. In this approach, we attempt to create a relation between input data and class labels in a tree-like structure. However, as a supervised learning algorithm, this requires the input data to be labeled. A common problem with these approaches is the necessity of having a large number of labeled examples. With rapid developments in security penetration, a problem has appeared where new penetration methods appear frequently and gathering enough packet samples for model training becomes a difficult task. Therefore, the aim of this research

is to develop a method for classifying network traffic with a small number of labeled examples.

Problem definition. The core problem that the research focuses on is the problem of malicious traffic identification and categorization. The first part of the problem is the identification of whether or not traffic is malicious in nature. Malicious traffic is one that can be used to attack the computer network and individual devices in the network and includes malware, DoS attacks, network scanning, data exfiltration, R2L, etc. The second part of this problem is the categorization of malicious traffic.

Relevant works. A number of researchers have tackled the problem of network attack classification [1, 2] and the effect of malicious traffic on computer networks [3, 4]. Of particular interest to this paper is the general approach to performing a network attack described in [1], as well as the classification and effects described in [2] and [3], respectively.

Additionally, research into intrusion detection and, more importantly, an analysis of malicious traffic packet contents [5–7] help connect network attacks to packet contents. This allows for the definition of features used by the machine learning algorithm.

Lastly, research in the area of applying machine learning to solve network intrusion detection problems was performed [8], where a variety of models and algorithms were used. Approaches to categorizing tabular data with ML algorithms are described in [9]. This research describes the architecture of GAN networks and semi-supervised GAN networks [10–12].

In the author's opinion, the problem of intrusion detection using machine learning algorithms when there is



insufficient data remains understudied. Additionally, proposed solutions may encounter difficulty with generalization when being applied in different scenarios. A GAN-based model could be used to achieve a greater degree of generalization.

Research objective. The purpose of this work is to research methods and models of malicious network traffic detection and categorization with the use of artificial intelligence models. Additionally, the purpose of the work is to create a ML model that can be used to detect and classify malicious traffic with packet information.

Dataset information.

The dataset used in this research is NSL-KDD [13], which contains 125000 examples of network traffic packet data as well as 22 categories based on attack type. Packets labeled “normal” indicate no attack. The features used in the classification include internet protocol used, service used, login status, login attempts, attempts to take root status, file and script creation, error rate, and others, for a total of 41 features. A total of 67000 records are labeled as non-malicious traffic, and 58000 are labeled as malicious (fig. 1, fig. 2, fig. 3).

Fig. 1 illustrates that most attacks seem to occur via tcp and icmp protocols, whereas udp connections are less likely to be malicious.

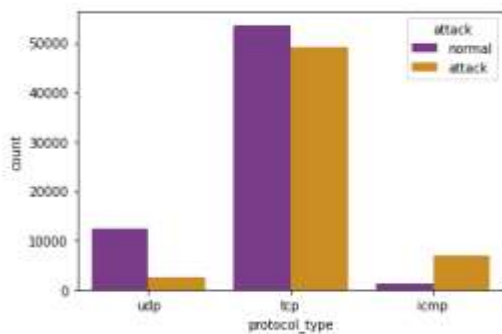


Fig. 1. Distribution of malicious and non-malicious traffic with regards to protocol used

Fig. 2 shows a small sample of dataset entries. Here we can see that most of the data is continuous numerical data. However, it should be noted that the fields “protocol”, “service,” and “flag” are categorical.

	duration	protocol_type	service	flag	src_bytes	dst_bytes
0	0	1	20	9	491	0
1	0	2	44	9	146	0
2	0	1	49	5	0	0
3	0	1	24	9	232	8153
4	0	1	24	9	399	420
...
125968	0	1	49	5	0	0
125969	8	2	49	9	105	145
125970	0	1	54	9	2231	384
125971	0	1	30	5	0	0
125972	0	1	20	9	151	0

Fig. 2. Selection of examples from the dataset [13]

```

RangeIndex: 125973 entries, 0 to 125972
Data columns (total 43 columns):
#   Column              Non-Null Count  Dtype
---  -
0   duration            125973 non-null  int64
1   protocol_type      125973 non-null  int64
2   service            125973 non-null  int64
3   flag               125973 non-null  int64
4   src_bytes          125973 non-null  int64
5   dst_bytes          125973 non-null  int64
6   land               125973 non-null  int64
7   wrong_fragment    125973 non-null  int64
8   urgent            125973 non-null  int64
9   hot               125973 non-null  int64
10  num_failed_logins  125973 non-null  int64
11  logged_in         125973 non-null  int64
12  num_compromised   125973 non-null  int64
13  root_shell        125973 non-null  int64
14  su_attempted      125973 non-null  int64
15  num_root          125973 non-null  int64
16  num_file_creations 125973 non-null  int64
17  num_shells        125973 non-null  int64
18  num_access_files  125973 non-null  int64
19  num_outbound_cmds 125973 non-null  int64
20  is_host_login     125973 non-null  int64
21  is_guest_login    125973 non-null  int64
22  count             125973 non-null  int64
23  srv_count         125973 non-null  int64
24  serror_rate       125973 non-null  float64
25  srv_serror_rate   125973 non-null  float64
26  rerror_rate       125973 non-null  float64
27  srv_rerror_rate   125973 non-null  float64
28  same_srv_rate     125973 non-null  float64
29  diff_srv_rate     125973 non-null  float64
30  srv_diff_host_rate 125973 non-null  float64
31  dst_host_count    125973 non-null  int64
32  dst_host_srv_count 125973 non-null  int64
33  dst_host_same_srv_rate 125973 non-null  float64
34  dst_host_diff_srv_rate 125973 non-null  float64
35  dst_host_same_src_port_rate 125973 non-null  float64
36  dst_host_srv_diff_host_rate 125973 non-null  float64
37  dst_host_serror_rate 125973 non-null  float64
38  dst_host_srv_serror_rate 125973 non-null  float64
39  dst_host_rerror_rate 125973 non-null  float64
40  dst_host_srv_rerror_rate 125973 non-null  float64
41  attack            125973 non-null  int64
42  level            125973 non-null  int64
dtypes: float64(15), int64(28)
memory usage: 41.3 MB
    
```

Fig. 3. Dataset information [13]

Fig. 3 shows all of the data fields used in the dataset. This presents the full set of features (for this dataset) that may be used to identify malicious traffic. For the purposes of this research, no significant data processing was performed.

Presentation of the main material.

The following data pre-processing was performed: the categorical values were converted to numerical values, the dataset was scaled using standard scaling, equation (1).

$$z = \frac{x - \bar{\mu}}{\sigma}, \tag{1}$$

where z – standardized value.

x – original feature vector.

$\bar{\mu}$ – mean of the feature vector.

σ – standard deviation of the feature vector.

The labels were one-hot encoded in order to be used for categorical classification.

For training, we make use of a 70:30 split of training to test data.

As a baseline classifier, a simple deep neural network was implemented using TensorFlow keras with two fully connected layers with 32 and 16 neurons, activation function is “relu”, batch normalization layers, and dropout layers to prevent overfitting (fig. 4). The final layer is a dense layer with “softmax” activation for categorical classification.

Model metrics are “categorical_crossentropy” for loss function and “categorical_accuracy” for accuracy. The model was trained for 50 epochs on the dataset and achieved 99 %

accuracy, indicating possible overfitting (fig. 5). This classifier will be used to evaluate the performance of the GAN-based classifier.

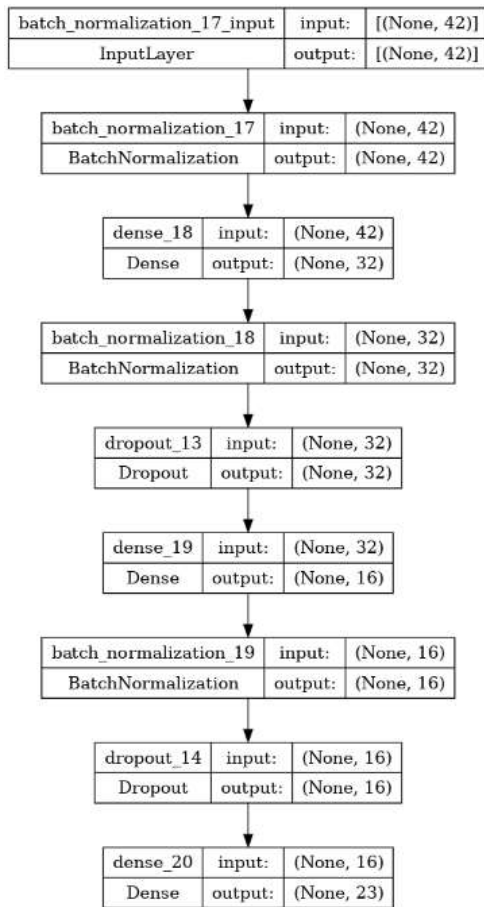


Fig. 4. Baseline classifier model

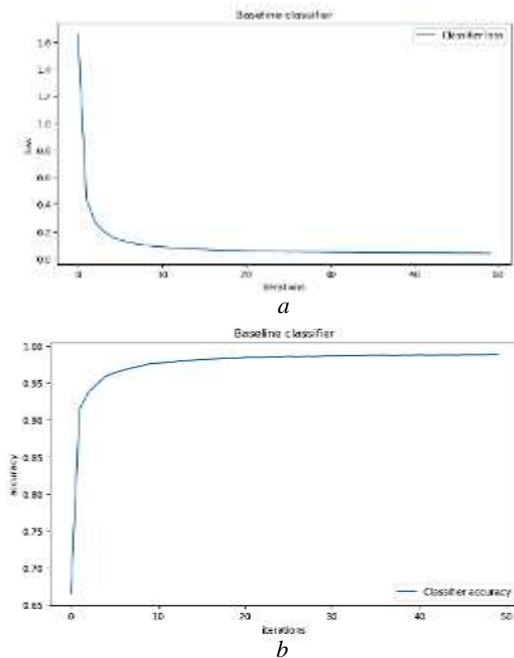


Fig. 5. Baseline classifier model training metrics: *a* – loss metric, *b* – accuracy metric

The second model is based on a generative adversarial network (GAN). These networks consist of a generator model and a classifier model. The generator uses gaussian distribution noise to generate fake information, equation (2).

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

where $P(x)$ – probability density function for x .

x – original feature vector.

μ – mean of the distribution.

σ – standard deviation of the distribution.

The classifier model of GAN is used to classify generator output as real or fake. For this, a DNN with sigmoid activation is used, somewhat similar to the baseline classifier network shown earlier. The result of the classification is used to calculate generator loss and discriminator loss (fig. 6). This allows the generator to be trained to create more believable fake data.

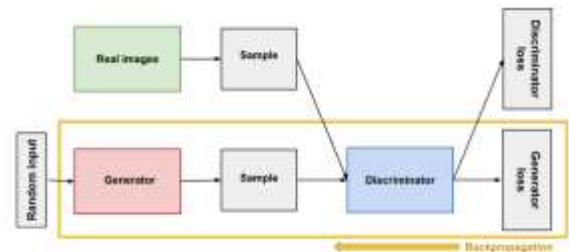


Fig. 6. General architecture of a GAN network [14]

As seen in fig. 6, the GAN network can use portions of real data and generator input to create fake data. This data is then categorized by the discriminator model. The main purpose of such a network is to train the generator model to create fake data that is similar enough to real data that the discriminator model cannot tell a difference.

A subtype of GAN networks is a semi-supervised GAN. These are often used when trying to create a generator with few real samples available. In this case, the discriminator predicts $N+1$ classes, with an additional label being used for fake data classification. Of particular interest to this research is the efficiency of the categorical discriminator, not the generator model. The approach used is to feed a small number of labeled samples to the classifier on each iteration alongside a large number of unlabeled samples, partially by removing labels from real data and by using generated data.

In our implementation, we use two discriminator models, one for real/fake categorization and another for attack categorization. The target of the research is the attack categorization model. The models share weights to ensure correct categorization for real and fake as well as attack class. We use two dense layers of size 256 and “relu” activation, as well as batch normalization and dropout layers. Output layers are “softmax” for the categorical classification model and “sigmoid” for binary classification. Loss functions and metrics are “categorical_crossentropy”, “binary_crossentropy”, “categorical_accuracy” and “binary_accuracy” for the

categorical discriminator and the binary discriminator, respectively (fig. 7, fig. 8). Since all of our input data is labeled, we only use a small sample of labeled entries, between 100 and 500 samples, as input for the categorical classifier model. For the generator, a model with three dense layers was used with 128, 256, and 512 nodes and “relu” activation. Additionally, batch normalization and dropout layers were used. The output layer is a dense layer with nodes equal to the number of features and “tanh” activation (fig. 9). For model training, 10 epochs were used. With final training, categorical accuracy is around 99 % and binary accuracy is around 78 %. Final validation categorical accuracy is around 89 %. This indicates possible model overfitting (fig. 10–12).

```
Model: "model"
```

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_1 (InputLayer)	[(None, 42)]	0
dense_3 (Dense)	(None, 256)	11008
batch_normalization_3 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dropout_2 (Dropout)	(None, 256)	0
dense_4 (Dense)	(None, 256)	65792
batch_normalization_4 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dropout_3 (Dropout)	(None, 256)	0
output_cat (Dense)	(None, 23)	5911

Total params: 84,759
Trainable params: 5,911
Non-trainable params: 78,848

Fig. 7. Categorical discriminator model

```
Model: "model_1"
```

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_1 (InputLayer)	[(None, 42)]	0
dense_3 (Dense)	(None, 256)	11008
batch_normalization_3 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dropout_2 (Dropout)	(None, 256)	0
dense_4 (Dense)	(None, 256)	65792
batch_normalization_4 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dropout_3 (Dropout)	(None, 256)	0
output_bin (Dense)	(None, 1)	257

Total params: 79,105
Trainable params: 0
Non-trainable params: 79,105

Fig. 8. Binary discriminator model

In fig. 7 and fig. 8, we can see the characteristics of the classifier models. As mentioned before, the classifier model from fig. 7 is used to predict class labels, and the binary classifier from fig. 8 is used to improve the generator model.

In fig. 9, a generator model is presented that takes an input of gaussian noise and real data and outputs generated data fields similar to the initial dataset. The final layer of the model goes directly into the classifier model.

```
Model: "model_3"
```

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_3 (InputLayer)	[(None, 64)]	0
dense_5 (Dense)	(None, 128)	8320
dropout_4 (Dropout)	(None, 128)	0
batch_normalization_5 (Batch Normalization)	(None, 128)	512
dense_6 (Dense)	(None, 256)	33024
dropout_5 (Dropout)	(None, 256)	0
batch_normalization_6 (Batch Normalization)	(None, 256)	1024
dense_7 (Dense)	(None, 512)	131504
dropout_6 (Dropout)	(None, 512)	0
batch_normalization_7 (Batch Normalization)	(None, 512)	2048
dense_8 (Dense)	(None, 42)	21546
model_1 (Functional)	(None, 1)	79105

Total params: 277,163
Trainable params: 196,206
Non-trainable params: 80,957

Fig. 9. GAN (generator and discriminator) model

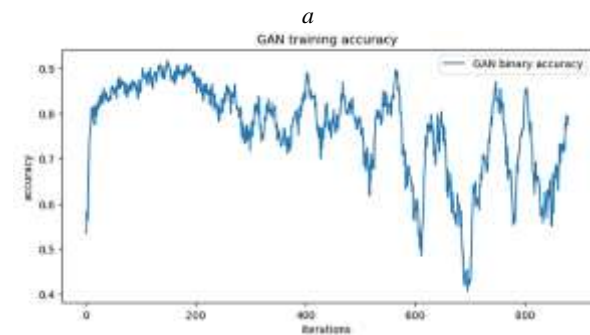
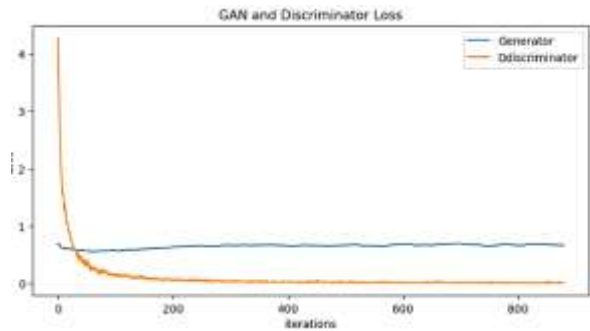


Fig. 10. GAN model metrics: a – generator and binary discriminator loss metrics; b – binary discriminator accuracy

In fig. 10, b we can see that the binary discriminator accuracy can fluctuate a lot, whereas in 10, a we can see that the loss of the binary discriminator is steady and decreasing. This means that the generator is producing data similar to real samples.

In fig. 11, a we can see that the training accuracy for the categorical classifier is high, reaching over 90 %; however, in fig. 11, b and fig. 12 we can see that the loss and accuracy on validation samples are lower, at 88 %. This may be explained by overfitting, perhaps due to model complexity or the values of the generated data being too

disjointed from one another compared to real data. For example, a combination of certain values in data fields in real samples may indicate an attack, whereas in generated samples, these values may differ; however, the data would still be created under the “attack” label.

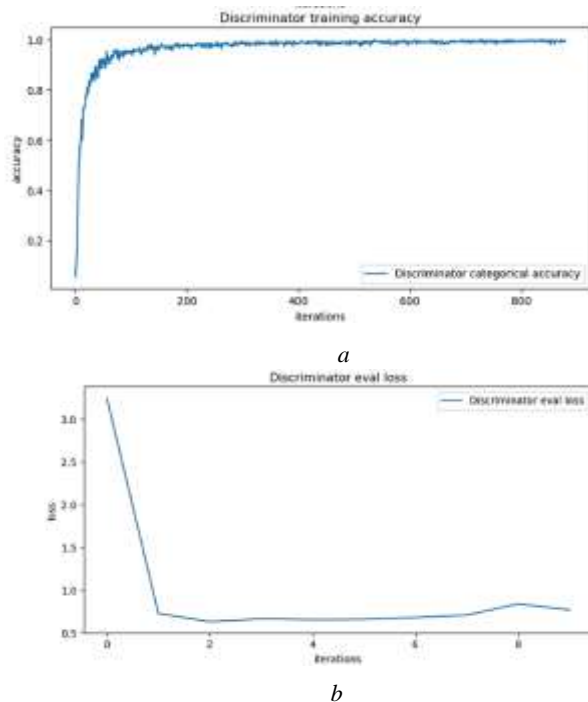


Fig. 11. Categorical classifier metrics: *a* – classifier training accuracy; *b* – discriminator loss on validation data

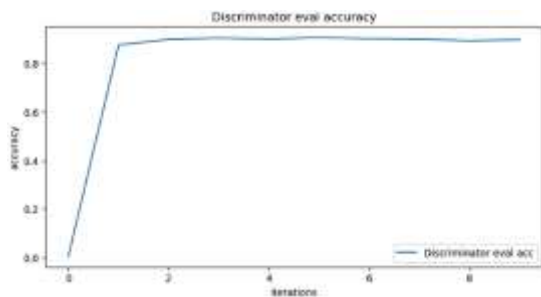


Fig. 12 Classifier model accuracy on validation data

Conclusions. This research proposes the use of semi-supervised GAN model to train a classifier network for categorizing malicious network traffic with a limited number of labeled entries. For comparison, we also used a baseline classifier DNN with a full dataset. The baseline classifier managed to achieve a validation accuracy of 99 %, whereas the SGAN discriminator only achieved 88 %. The SGAN discriminator shows signs of overfitting with a training accuracy of 99 %. While the results are subpar compared to a full dataset classifier, it is worth noting that the SGAN model only received a small portion of the dataset labels, between 100 and 500 samples, in different tests while still achieving a relatively high accuracy score. It should also be pointed out that GAN networks generally have trouble generating entirely new information; instead, they create slight variations of

existing data. As such, it may not be able to be used to train a network to predict entirely unknown threats.

Overall, SGAN networks may not be an effective solution to training network attack classifiers; however, additional research may be conducted. In particular, the question of network hyperparameter tuning remains open, as it may allow us to prevent overfitting and improve model accuracy. Additionally, since the research was conducted only on a single dataset, it is worth exploring additional datasets to further evaluate the proposed solution.

References

- Chasaki D., Wu Q., Wolf T. *Attacks on network infrastructure. 2011 20th international conference on computer communications and networks (ICCCN) Lahaina, HI, USA, 31 July – 4 August 2011*. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/icccn.2011.6005919> (date of access: 01.08.2023).
- Anderson R. *Security engineering: a guide to building dependable distributed systems*. 2nd ed. Indianapolis, IN : Wiley Technology Pub., 2008.
- Kun-chan L., Alefiya H., Debojyoti D. *Effect of malicious traffic on the network*. The ANT Lab: Analysis of Network Traffic. URL: <https://ant.isi.edu/~johnh/PAPERS/Lan03a.pdf> (date of access: 03.07.2023).
- Dubrawsky I., Noonan W. *Firewall fundamentals*. Cisco Press, 2006. 408 p.
- John W., Olovsson T. Detection of malicious traffic on back-bone links via packet header analysis. *Campus-Wide information systems*. 2008. Vol. 25, no. 5. P. 342–358. URL: <https://doi.org/10.1108/10650740810921484> (date of access: 14.08.2023).
- Network traffic analysis and intrusion detection using packet sniffer / M. A. Qadeer et al. *2010 second international conference on communication software and networks, Singapore, 26–28 February 2010*. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/iccsn.2010.104> (date of access: 12.09.2023).
- Wang W., Gombault S., Guyet T. Towards fast detecting intrusions: using key attributes of network traffic. *2008 the third international conference on internet monitoring and protection, Bucharest, Romania, 29 June – 5 July 2008*. 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/icimp.2008.13> (date of access: 09.10.2023).
- Panda M. A., Iqbal A., Zahid M., Siddiqui M. R. Network intrusion detection system: a machine learning approach. *Intelligent decision technologies*. 2011. Vol. 5, no. 4. P. 347–356. URL: <https://doi.org/10.3233/idt-2011-0117> (date of access: 27.10.2023).
- Kelleher J. D., D'Arcy A., Namee B. M. *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies*. MIT Press, 2015. 624 p.
- Odena A. *Semi-Supervised learning with generative adversarial networks*. arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1606.01583> (date of access: 14.10.2023).
- Pasupa K., Tungjitnob S., Vatathanavaro S. Semi-supervised learning with deep convolutional generative adversarial networks for canine red blood cells morphology classification. *Multimedia tools and applications*. 2020. Vol. 79, no. 45–46. P. 34209–34226. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08767-z> (date of access: 18.10.2023).
- Langr J., Bok V. *GANs in action: deep learning with generative adversarial networks*. Manning Publications Company, 2019. 276 p.
- Zaib H. *Nsl-kdd*. Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/hassan06/nslkdd/data> (date of access: 05.09.2023).
- Overview of GAN structure | machine learning | google for developers. *Google for Developers*. URL: https://developers.google.com/machine-learning/gan/gan_structure (date of access: 20.10.2023).

References (transliterated)

- Chasaki D., Wu Q. and Wolf T., Attacks on network infrastructure. In: *2011 20th international conference on computer communications*

- and networks (ICCCN) 31 July–4 August 2011, Lahaina, HI, USA [online]. IEEE. [Viewed 1 November 2023]. Available from: doi: 10.1109/icccn.2011.6005919
2. Anderson R., Security engineering: a guide to building dependable distributed systems. 2nd ed. Indianapolis, IN: Wiley Technology Pub., 2008.
 3. Kun-chan, L., Alefiya, H. and Debojyoti, D., *Effect of malicious traffic on the network* [online]. The ANT Lab: Analysis of Network Traffic. 2009, [Viewed 3 July 2023]. Available from: <https://ant.isi.edu/~johnh/PAPERS/Lan03a.pdf>
 4. Dubrawsky I. and Noonan W., Firewall fundamentals. Cisco Press, 2006.
 5. John W. and Olovsson T., Detection of malicious traffic on back-bone links via packet header analysis. *Campus-Wide Information Systems* [online]. 25(5), 2008, 342–358. [Viewed 14 August 2023]. Available from: doi: 10.1108/10650740810921484
 6. Qadeer M. A., Iqbal A., Zahid M. and Siddiqui, M. R., Network traffic analysis and intrusion detection using packet sniffer. In: *2010 second international conference on communication software and networks, 26–28 February 2010, Singapore* [online]. IEEE. [Viewed 12 September 2023]. Available from: doi: 10.1109/iccsn.2010.104
 7. Wang W., Gombault S. and Guyet T., Towards fast detecting intrusions: using key attributes of network traffic. In: *2008 the third international conference on internet monitoring and protection, 29 June–5 July 2008, Bucharest, Romania* [online]. IEEE. [Viewed 9 October 2023], 2008, Available from: doi: 10.1109/icimp.2008.13
 8. Panda M. A., Iqbal A., Zahid M., Siddiqui M. R. Network intrusion detection system: a machine learning approach. *Intelligent Decision Technologies* [online]. 5(4), 2011, 347–356. [Viewed 27 October 2023]. Available from: doi: 10.3233/idt-2011-0117
 9. Kelleher J. D., D'Arcy A., Namee B. M. Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies. MIT Press, 2015.
 10. Odena A. *Semi-Supervised learning with generative adversarial networks* [online]. arXiv.org. [Viewed 14 October 2023], 2016, Available from: <https://arxiv.org/abs/1606.01583>
 11. Pasupa K., Tungjitnob S., Vatathanavaro S. Semi-supervised learning with deep convolutional generative adversarial networks for canine red blood cells morphology classification. *Multimedia Tools and Applications* [online]. 79(45–46), 2020, 34209–34226. [Viewed 18 October 2023]. Available from: doi: 10.1007/s11042-020-08767-z
 12. Langr J., Bok V. GANs in action: deep learning with generative adversarial networks. Manning Publications Company, 2019.
 13. Zaib H. *Nsl-kdd* [online]. Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community, 2018, [Viewed 05 September 2023]. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/hassan06/nslkdd/data>
 14. Overview of GAN structure | machine learning | google for developers [online], *Google for Developers* [Viewed 20 October 2023]. Available from: https://developers.google.com/machine-learning/gan/gan_structure

Received 27.10.2023

УДК 004.056:004.089

А. К. ДРЕМОВ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри обчислювальної техніки, факультет інформатики та обчислювальної техніки, м. Київ, Україна, e-mail: a.k.dremov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7214-9458>

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОНИТОРИНГУ БЕЗПЕКИ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Ця стаття має на меті запропонувати рішення для виявлення та категоризації шкідливого мережевого трафіку. Віддалені атаки на комп'ютерні системи стають все більш поширеними та небезпечними в наш час. Це пов'язано з декількома факторами, деякі з яких наведені нижче. По-перше, зростає використання комп'ютерних мереж та мережевої інфраструктури в цілому за допомогою таких інструментів, як месенджери, електронна пошта тощо. По-друге, разом зі збільшенням використання зростає і обсяг конфіденційної інформації, що передається мережами. По-третє, зросло використання комп'ютерних мереж у складних системах, таких як електромережі, хмарні обчислення, а також Інтернет речей і «розумні» локації (наприклад, «розумне місто»). Виявлення шкідливого мережевого трафіку є першим кроком у захисті від віддаленої атаки. Історично це робилося за допомогою різних алгоритмів, в тому числі алгоритмів машинного навчання, таких як кластеризація. Однак ці алгоритми вимагають великої кількості вибірових даних, щоб бути ефективними проти певної атаки. Це означає, що захист від атак нульового дня або атак з великою дисперсією вхідних даних виявляється складним для таких алгоритмів. У цій статті ми пропонуємо напівкеровану генеративну змагальну мережу (GAN) для навчання моделі дискримінатора для класифікації зловмисного трафіку, а також для ідентифікації зловмисного і нешкідливого трафіку. Запропоноване рішення складається з генератора GAN, який створює табличні дані, що представляють мережевий трафік від віддаленої атаки, і класифікатора глибокої нейронної мережі для цього трафіку. Основна мета – досягти точної категоризації шкідливого трафіку за допомогою невеликої кількості маркованих прикладів. Теоретично це також може підвищити точність класифікації порівняно з повністю контрольованими моделями. Це також може покращити ефективність моделі проти абсолютно нових типів атак. Отримана модель покаже точність передбачення 91%, що нижче, ніж у звичайної моделі глибокого навчання, однак ця точність досягається на невеликій вибірці даних (менше 1000 маркованих прикладів). Таким чином, результати цього дослідження можуть бути використані для підвищення безпеки комп'ютерних систем, наприклад, за допомогою динамічного налаштування правил брандмауера на основі результатів класифікації вхідного трафіку. Запропонована модель була реалізована та протестована на мові програмування Python та фреймворку Tensorflow. Для тестування використовувався набір даних NSL-KDD.

Ключові слова: кібербезпека, мережева безпека, ідентифікація шкідливого трафіку, машинне навчання, генеративні змагальні мережі, напівкероване навчання

Повне ім'я автора / Author's full name

Автор 1 / Author 1: Дремов Артем Кирилович, Dremov Artem Kyrylovych

O. M. NIKULINA, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Information Systems and Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: elniknik02@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>

K. O. KHATSKO, Senior Lecturer of the Department of the Department of Information Systems and Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Graduate Student, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kirylo.khatsko@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-1553>

METHOD OF CONVERTING THE MONOLITHIC ARCHITECTURE OF A FRONT-END APPLICATION TO MICROFRONTEENDS

Web systems have existed for a long time and quite a lot of them have been created. Modern development uses new microservice architectural to improve performance, portability, and other important characteristics. This necessitates the transformation of legacy systems from a monolithic architecture to a microservices one. Such a process is complex and costly, so improving the methods for converting old systems to a new platform is relevant. This research aims to develop a method of applying microfrontends approach for monolithic single page applications (SPA). The article proposes a method of transforming the software system architecture from monolithic to microservice architecture (MSA). Since the client part of the system is considered, the term microfrontend is proposed, as an analog of microservers in the server part of the software systems. A brief review of existing architecture reengineering research is made and the advantages of a microservice approach are identified. The proposed three-stage method differs from the methods by the selection of an additional stage of conversion, which allows to gently change the connections between parts of the monolithic application, which were implemented in the initial monolithic architecture. The first stage is reverse engineering, it is proposed to shift the focus from the search for outdated code to the functional analysis of the program as such. The second stage, a transition to a modular architecture with the allocation of functionality into separate modules is proposed. At the end of the third stage, we have several separate programs (microinterfaces) that are connected to the main program. An experiment with a typical external SPA demonstrates the operation of the proposed algorithm. The system obtained as a result of the transformation is compared with the original one according to the following measurable parameters: production builds building time, size of the main bundle, and first page average load time. All comparisons showed the advantages of the system obtained as a result of the conversion. As a result, the architecture transformation algorithm allows you to obtain a guaranteed better result, taking into account the limitations of the interface SPA, which were not considered by the authors of previous articles.

Keywords: information system, software architecture, algorithm, monolith model of an information system, software development process, software migration, microservice architecture, single page application, method of converting to microfrontends.

Introduction. To create scalable, future-oriented software systems in modern industrial programming, the microservice architectural approach is increasingly used [1, 2]. Microservices break traditional monolithic applications into a set of smaller services that can be independently developed, tested, and deployed [3]. Due to highly decoupled software modules, microservice applications are easy to debug, update, use third-party code, therefore, in a professional environment, they believe that the future is theirs [4].

However, many applications have already been developed as monolithic or modular, so in order to improve these applications, it is necessary to migrate them to a microservice architecture. Such actions have become the preferred solution for software upgrades [5] than new development.

With the development of browser-based client applications, as well as the requirements for them, the same problems that occur in monolithic backend applications become more and more relevant, this is especially acute in single page applications (SPA), which were originally conceived as a single monolith.

We use a microservice approach to break a monolithic SPA application into separate microfrontends. The topic of this paper is the method of converting the monolithic architecture of front-end applications to microfrontends.

Lets' talk about motivation. Just imagine that you're the developer on some great project with a beautiful microservice architecture. Each service is developed by

separate team, services are tested and deployed in isolation. But let's back from imagine and see what we have on frontend. Here is the typical SPA application. It's designed with modern framework, but it is monolithic by its nature with all the disadvantages of this architecture. So we think may be we can do something like this – apply microfrontends.

In the second section we analyse existing articles and papers related to the strategies of the migration to the microservice architecture. We highlight that this migration could be successfully applied to solve an existing problems that could be occurred in applications with monolithic architecture approach. We also point that despite of the existence of the fact that all of the problems of the monolithic backend applications are inherent in front-end applications, approach with dividing has been less reflected in front-end development.

In next section we describe exiting methods of migration to the microservices. We propose to use a microservice approach to break a monolithic SPA application into separate microfrontends. In this section we also highlight limitations of the front-end SPA applications that could not allow to apply existing methods directly for converting its monolithic architecture into separate independent units similar to microservices. Here the additional motivation of such migration is described. Finally in the main part of the section, we propose new determination of the existing steps and describe all the changes to be done on every step.

© Nikulina O. M., Khatsko K. O., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Common [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



The next sections describes the existing technical approaches to organize microfrontends. Here we mention the main advantages and disadvantages of these approaches and the ability to be used for SPA.

The results section contains a description of an experiment to prove the method proposed. Here we highlight the requirements to the application that should be the subject of the experiment of the architectural transformation to the microfrontends. We point the detailed description of the changes in code and architecture according to the previously explained method steps. In this section the choice of a technical solution for the organization of microfrontends is justified. New microfrontends are hosted and the final application is evaluated.

In the last section we point the questions that are still not covered in the current experiment or could be improved in future works.

Analysis of Migration Strategies. Many business applications have been in use for many years, their development does not stop, and a lot of unsuccessfully fixed bugs have accumulated [6]. It would be useful for such applications to get a second life with a new architecture without this accumulated set of bugs. There is reason to believe that migrating to a microservice architecture will help overcome the existing problems. Particular reasons for migrating older applications are the fact that microservices improve maintainability over traditional monoliths due to a smaller code base, strong isolation of components, and organization of microservices around business functionality. In addition, the development company has the ability to create autonomous teams of employees, which should reduce coordination efforts and increase team productivity.

However, the introduction of microservices can complicate the quality assurance of systems [7]. From an architectural point of view, quality assurance is considered a key issue when migrating or developing systems based on microservices [8]. Most of the existing research on microservices is focused on architectural principles and the application of architectural patterns [9-11] in microservice migration practices, which can provide an analytical view of the common patterns and methods used for MSA, and can be considered the starting point of our work. Many researchers have contributed to the development and quality improvement of systems based on microservices [2, 3, 12].

As a result, MSA has also become the preferred path for software upgrades based on the architecture [13].

There are many examples of successful rewriting of applications based on microservices [14], when, next to the original, applications are made immediately in the execution of microservices [13, 15, 16].

While MSA has gained a lot of popularity as an architectural style for back-end development of web applications, this architecture has been less reflected in front-end development. Web applications have been around for a long time and many large systems have accumulated that have a monolithic architecture. This statement applies to both the server side and the browser side. For several years, research has been published on the transformation of the back-end from a monolithic or modular architecture to a microservice one [4, 17, 18].

Migration method. Since the microservice architecture primarily touched server applications, we will first consider the published methods for migrating to MSA.

The process of moving from an existing system to microservices, based on earlier work on systems reengineering, is described in three steps: reverse engineering, architecture transformation, and forward engineering [19].

The described migrations were motivated by the need to partially or completely modernize the system, to some extent such a system was considered legacy, so the system that existed before the migration was called pre-existing, and the target microservice system was called new system. At the reverse engineering step, the system was analyzed to identify obsolete code, which became a candidate for transferring it to services. Further, this transformation was a restructuring of the code with the transformation of the current architecture to a microservice one, but maintaining the same level of abstraction. At this step, the architecture, business model and business strategy are changed. At the stage of backward engineering, the system is being finalized, implemented and deployed.

However, the browser part of the system, the so-called front-end, has a number of limitations that make such a conversion a difficult task. Such limitations include the need to work with a single environment. It is executed on the client side, so within one application there is always only one address bar, one global BOM object, and, accordingly, the DOM that is part of it. It is around this problem that the main limitations of microfrontends are built.

The authors present the adapted process of transition of a monolithic SPA application to microfrontends as follows on fig. 1:

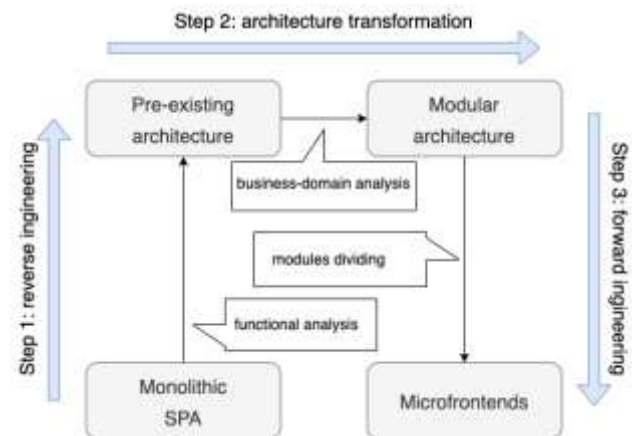


Fig. 1. Migration to microfrontends

The SPA approach has become popular relatively recently, so the motivations for migrating to microfrontends are caused not so much by outdated architecture, but by the non-functional benefits that microfrontends can provide. That is why the authors propose to revise the above transition steps and specify them as more appropriate in the context of working with client applications. So, for example, at the stage of reverse engineering, it is proposed to shift the focus from the search for legacy code to the functional analysis of the application

as such. At this step, functions are grouped, unified, large functions can be separated. At the end of this step, our architecture (pre-existing) is still monolithic and requires further analysis before moving on to the next step.

The purpose of the stage of architecture transformation is to analyze the current application to determine the main business functions of the application and, based on them, to identify potentially separate parts of the application that should not depend on each other as much as possible. For these purposes, you can use the Strategic Design Domain-driven design approach. In the context of DDD, the main application domains are identified. To successfully solve this problem, all stakeholders can be involved: developers, architects, product owners; the project documentation is studied, compared with the main business requirements.

Based on the allocated domains, the application modules are created, which allows us to move to the modular architecture stage. It should be noted that at this stage we have already solved some problems inherent in monoliths: code is more structured and less coupled. And although we still have one application with bundles hosted on the one server, this architecture allows us to organize lazy loading of modules. This leads to a decrease in the size of the main bundle, and hence to a decrease in the initial load time of the application.

On the forward engineering step, the coupling between the components of the different modules are finally broken. At this stage, a technical solution for organizing microfrontends should be selected. Due to the limitations of client applications, in any division into separate parts we still need one main application to manage other microservices. All existing technical solutions come down to solve the problem of how individual microfrontends connect to the main application and how it orchestrates them.

Step by step architecture changes are described on fig.2.

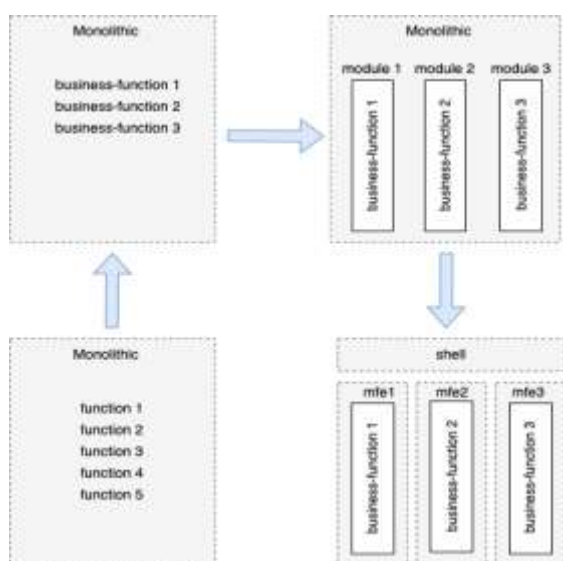


Fig. 2. Architecture transformation during migration to microfrontends

On the step of the backward engineering step there is no architecture changes. Here we can see changes on low level: grouping, unifying or removing unused functions. On this step we still have the same business models as in pre-existing system. On the next step the transformation of the architecture is finally take place. By the end of the step we have modular monolithic architecture. Business models could be changed to ensure better isolation of the modules. These modules are candidates to be moved into separate micro-frontends on the last step of the forward engineering step. By the end this step we have several separate applications (microfrontends) that are connected to the main application (shell).

Technical solutions for microfrontends. Currently there are several variants how to provide microfrontend architecture. The simplest way to organize microfrontends is to create several independent applications. We need to have one main application with hyperlinks to other microfrontend applications. Clicking on such hyperlink the user is navigated to the other application with other URL. The only benefit of this approach is its simplicity, but bad user experience is the biggest price for this advantage.

Another commonly used variant is applying single-spa framework. The idea is to create framework-specific wrapper for every microfrontend application to integrate them in one single-spa application. The main disadvantage of this approach is the necessary to follow strict single-spa framework rules for every microfrontend to organize integration with other microfrontends. If there is a ready-made application, then it is a bug risk that it should be rewritten taking into account the single-spa rules.

One of the most popular mechanisms is to apply i-frames. All necessary widgets should be placed in i-frames that load the corresponding microfrontend hosted on separate host. Data is exchanged between them using POST messages. The main disadvantage of the approach is the necessary of the loading full bundle of the microfrontend. This fact limits ability to use i-frames only for good isolated applications. Another downside is the risk of reloading libraries with the microfrontend bundles.

The most modern way to work with microfrontends is to apply the Module Federation feature of the Webpack module bundler. This approach allows both the good communication of the microfrontends and the ability to avoid code duplication. The main idea of the approach is configure the shell application to import just the necessary module from microfrontend application.

Results. The authors took for consideration the previously created Chess Tutorials application, on the client part of which experiments were carried out. When writing, the authors, recognizing the problem, chose an application that has a large number of internal communications, in order to maximally reflect the problems that developers face in the process of solving real problems. The client part is typical monolithic SPA created on the Angular framework with state management organized with NgRx. The application is an educational platform for learning the game of chess. The application is designed for two types of clients – teachers and students.

To prove the ability to apply the proposed method of converting the pre-existing monolithic SPA was refactored

according to all the necessary steps of migration: reverse engineering, architecture transformation, and forward engineering.

At the stage of backward engineering, the interface elements were unified, large analyzed, reused components were identified. Functions related to authorization and student entities were separated; an application routing was changed by adding new route for home page, Angular SDK was upgraded to higher version etc.

At the next stage, an analysis of the business functions of the application was carried out. Business requirements defined the following abilities for different types of users: tutors could invite students to the system, create lessons and manage study groups, including tracking learning statistics for students; students could complete tasks from the lessons available to them, view the study groups. All available business documentation was studied including vision and existing prototypes. The example of the documentation that could be applied to identify business domains is application user path is displayed on fig.3.

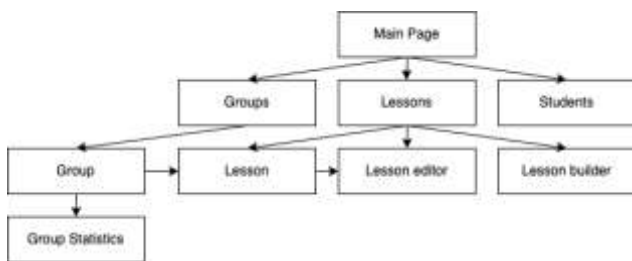


Fig. 3. Chess Tutorials documentation: path of the user with role tutor

Summarizing all the abilities and data from documentation, we identified such basic business functions as managing students, working with lessons, working with study groups. Based on the selected business functions, the following domains was determined: Lessons, Students, Groups and subdomain for Groups – Group Statistics. Schematic view of the modular application is displayed on fig. 4. Since domains must have a separate model valid only within their bounded context [21], at this stage, the application state (store) was restructured.

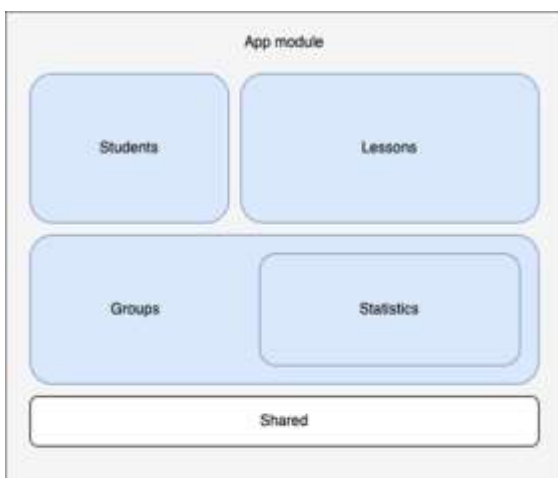


Fig. 4. Application structure by the end of the architecture transformation step

All support functions of the centralized storage have been broken into separate modules according to belonging to a certain domain. The models of User and Student have also been separated, since they belonged to different domains. In reality, it is not always possible to achieve complete isolation of domains. This is exactly the situation that the authors are faced with. To solve this problem, the data obtained during functional analysis were used – the identified reusable components were taken out into separate shared modules. It should be noted that creating a single shared module is a bad solution for large systems.

Since not all functions are reused in each of the above domains, it is recommended to organize several shared modules to prevent unnecessary functionality from being imported.

All the domain logic was moved to separate independent modules. All smart and dumb components and support services responsible for working with students were collected in the Students module; the components of the lesson builder, view and list of lessons (support services and other structures) were moved to the Lessons module; everything related to group management, including a separate module of Statistics, was moved to the Groups module. After the necessary transformations, the Chess Tutorials application still looked like one big monolithic application, but consisting of as much as possible separated domain modules, as well as shared modules. At this stage a lazy loading of the modules was applied. Domain modules also had their own internal routing. The above domain modules were the candidates for separate microfrontends. Module Statistics at this stage did not look independent enough to be moved to a separate domain, and, accordingly, was not a candidate for moving to a separate microfrontend. With the development of the application and with the addition of a new functions, such a transfer may become relevant in the future, so such a decision may be postponed for this stage.

On the forward engineering step, all possible links between domains was broken down as much as possible, since each domain will be placed in a separate application. Orchestration by these applications was done by a shell application that was built from the main application module. Orchestration itself was done using routing. On the last stage we finally created microfrontends. One of the problems that we faced at this stage is the correct development of individual microfrontends. Since they should be separate independent applications, duplication of a large amount of code, at least the framework itself and styles, cannot be avoided. Our domain modules still had some common functions placed in shared modules. We also had state manager and common data used in several modules. All this led to the fact that duplicate parts of the code would be loaded several times, for example, when using the i-frame approach. To avoid code duplication in bundles of the future microfrontends we applied Webpack Module Federation approach. Microfrontends was still separate independent applications with duplicated code, but webpack allowed to load only the necessary (declared) modules of microfrontend applications in the resulting application on the client side. Shared module was divided into separate shared libraries. New microfrontend

applications were created and main domains were moved from main application to them. After that we set up shell application to import just domain modules from our microfrontends and deployed all the applications separately. As a result we had shell application, mfe1 (Students), mfe2 (Lessons) and mfe3 (Groups).

Comparison of the pre-existing system and refactored system is displayed on table 1.

Table 1 – Pre-existing and target systems comparison

Measurable indicator	Pre-existing system (monolithic SPA)	Target system (Microfrontends)
Production builds building time, ms	20290	15363
Size of the main bundle, KB	540.5	82.7
First page average load time, ms	644	269

Because of the ability to run build process of every single microfrontend and shell application in parallel, the result build time could be equal to the build time of the largest application – mfe2. The size of the final bundle of the target system (microfrontends) has become smaller, which reduced the load time of the first page of the application.

Conclusions and Future Work. In current work, existing methods of migration to microservices are adopted to be acceptable for microfrontends. Steps of converting and new states of the application are defined and described to take into account the limitations of the front-end SPA which was not covered by authors of previous articles. Experiment with typical front-end SPA Chess Tutorials interface proved that the proposed conversion method shows a good result, in terms of the quality of the resulting software. Further research will be related to the concept of DDD for more efficient domain identification and microfrontend separation. Better understanding of conceptions of the strategic design and the boundary context will allow to design better domain models and as a result better isolated microfrontends.

References

1. Furrer F. J. *Future-Proof Software-Systems*. Springer, 2019. 376 p.
2. Gidey H. K., Marmsoler D., Eckhardt J. Grounded Architectures: Using Grounded Theory for the Design of Software Architectures. *IEEE International Conference on Software Architecture Workshops*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.41> (access date: 23.10.2023).
3. Terdal S. Microservices Enabled E-Commerce Web Application. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.45791> (access date: 23.10.2023).
4. Francesco P. D., Lago P., Malavolta I. Migrating towards microservice architectures: An industrial survey. *International Conference on Software Architecture*, URL: <https://doi.org/10.1109/ICSA.2018.00012>. (access date: 23.10.2023).
5. Cruz P., Astudillo H., Hilliard R., Collado M. Assessing Migration of a 20-Year-Old System to a Micro-Service Platform Using ATAM. *2019 IEEE International Conference on Software Architecture Companion* URL: <https://doi.org/10.1109/ICSA-C.2019.00039>. (access date: 23.10.2023).

6. Auer F., Lenarduzzi V., Felderer M., Taibi D. From monolithic systems to microservices: An assessment framework. *Information and Software Technology*, URL: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106600>. (access date: 23.10.2023).
7. Li S., Zhang H., Jia Z., Zhing C. et al. Understanding and addressing quality attributes of microservices architecture: A Systematic literature review. *Information and Software Technology*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106449>. (access date: 23.10.2023).
8. Soldani J., Tamburri D.A., Van Den Heuvel W.J. The pains and gains of microservices: a systematic grey literature review. *Journal of Systems and Software*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.09.082>. (access date: 23.10.2023).
9. Kazman R., Woods S. G., Carrie`re S. J. Requirements for integrating software architecture and reengineering models: Corum II. *Proceedings Fifth Working Conference on Reverse Engineering*. URL: <http://doi.org/10.1109/WCRE.1998.723185>. (access date: 23.10.2023).
10. Razavian M., Lago P. Understanding SOA migration using a conceptual framework. *Journal of Systems Integration*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/15455794.pdf> (access date: 23.10.2023).
11. Steyer M. *Enterprise Angular: Micro Frontends and Moduliths with Angular*. URL: <https://www.angulararchitects.io/en/book/>. (access date: 23.10.2023).
12. Homay A., Zoitl A., de Sousa M., Wollschlaeger M. A Survey: Microservices Architecture in Advanced Manufacturing Systems. *IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics*. URL: <http://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972079>. (access date: 23.10.2023).
13. Abdellatif M., Shatnawi A., Mili H., Moha N. et al. A Taxonomy of Service Identification Approaches for Legacy Software Systems Modernization. *Journal of Systems and Software*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110868>. (access date: 23.10.2023).
14. Hasselbring W., Steinacker G. Microservice Architectures for Scalability, Agility and Re-liability in E-Commerce. *IEEE International Conference on Software Architecture Workshops*. URL: <http://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.11>. (access date: 23.10.2023).
15. Patil M., Prajapat, S. Microservice Architecture for Scalability and Reliability in E-Commerce. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. URL: <http://doi.org/10.48175/IJARSC-2050>. (access date: 23.10.2023).
16. Asrowardi I., Putra S., Subyantoro E. Designing microservice architectures for scalability and reliability in e-commerce. *Journal of Physics: Conference Series*. URL: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012077>. (access date: 23.10.2023).
17. Evans E. *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. URL: <https://www.amazon.com/Domain-Driven-Design-Tackling-Complexity-Soft-ware/dp/0321125215>. (access date: 23.10.2023).
18. Blinowski G., Ojdowska A., Przybylek A. Monolithic vs. Microservice Architecture: A Performance and Scalability Evaluation. *IEEE Access*. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3152803>. (access date: 23.10.2023).
19. di Francesco P., Lago P., Malavolta I. Migrating Towards Microservices Architectures: An Industrial Survey. *IEEE International Conference on Software Architecture*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICSA.2018.00012>. (access date: 23.10.2023).

References (transliterated)

1. Furrer, F. J. *Future-Proof Software-Systems*. Springer, 2019. 376 p.
2. Gidey H. K., Marmsoler D., Eckhardt J. Grounded Architectures: Using Grounded Theory for the Design of Software Architectures. *IEEE International Conference on Software Architecture Workshops*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.41> (accessed 23.10.2023).
3. Terdal S. Microservices Enabled E-Commerce Web Application. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Available at: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.45791> (accessed 23.10.2023).
4. Francesco P.D., Lago P., Malavolta I. Migrating towards microservice architectures: An industrial survey. *International Conference on Software Architecture*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICSA.2018.00012>. (accessed 23.10.2023).

5. Cruz P., Astudillo H., Hilliard R., Collado M. Assessing Migration of a 20-Year-Old System to a Micro-Service Platform Using ATAM. *2019 IEEE International Conference on Software Architecture Companion*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICSA-C.2019.00039>. (accessed 23.10.2023).
6. Auer F., Lenarduzzi V., Felderer M., Taibi D. From monolithic systems to microservices: An assessment framework. *Information and Software Technology*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106600>. (accessed 23.10.2023).
7. Li S., Zhang H., Jia Z., Zhing C. et al. Understanding and addressing quality attributes of microservices architecture: A Systematic literature review. *Information and Software Technology*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106449>. (accessed 23.10.2023).
8. Soldani J., Tamburri D.A., Van Den Heuvel W.J. The pains and gains of microservices: a systematic grey literature review. *Journal of Systems and Software*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.09.082>. (accessed 23.10.2023).
9. Kazman R., Woods S. G., Carrie' re S. J. Requirements for integrating software architecture and reengineering models: Corum II. *Proceedings Fifth Working Conference on Reverse Engineering*. Available at: <http://doi.org/10.1109/WCRE.1998.723185>. (accessed 23.10.2023).
10. Razavian M., Lago P. Understanding SOA migration using a conceptual framework. *Journal of Systems Integration*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/15455794.pdf> (accessed 23.10.2023)
11. Steyer M. *Enterprise Angular: Micro Frontends and Moduliths with Angular*. Available at: <https://www.angulararchitects.io/en/book/>. (accessed 23.10.2023).
12. Homay A., Zoitl A., de Sousa M., Wollschlaeger M. A Survey: Microservices Architecture in Advanced Manufacturing Systems. *IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics*. Available at: <http://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972079>. (accessed 23.10.2023).
13. Abdellatif M., Shatnawi A., Mili H., Moha N. et al. A Taxonomy of Service Identification Approaches for Legacy Software Systems Modernization. *Journal of Systems and Software*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110868>. (accessed 23.10.2023).
14. Hasselbring W., Steinacker G. Microservice Architectures for Scalability, Agility and Re-liability in E-Commerce. *IEEE International Conference on Software Architecture Workshops*. Available at: <http://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.11>. (accessed 23.10.2023).
15. Patil M., Prajapat, S. Microservice Architecture for Scalability and Reliability in E-Commerce. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. Available at: <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-2050>. (accessed 23.10.2023).
16. Asrowardi I., Putra S., Subyantoro E. Designing microservice architectures for scalability and reliability in e-commerce. *Journal of Physics: Conference Series*. Available at: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012077>. (accessed 23.10.2023).
17. Evans E. *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. Available at: <https://www.amazon.com/Domain-Driven-Design-Tackling-Complexity-Soft-ware/dp/0321125215>. (accessed 23.10.2023).
18. Blinowski G., Ojdowska A., Przybylek A. Monolithic vs. Microservice Architecture: A Performance and Scalability Evaluation. *IEEE Access*. Available at: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3152803>. (accessed 23.10.2023).
19. di Francesco P., Lago P., Malavolta I. Migrating Towards Microservice Architectures: An Industrial Survey. *IEEE International Conference on Software Architecture*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICSA.2018.00012>. (accessed 23.10.2023).

Received 06.11.2023

УДК 004.9

О. М. НИКУЛІНА, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e mail: elniknik02@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>

К. О. ХАЦЬКО, старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», аспірант, Харків, Україна; e-mail: kyrylo.khatsko@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3315-1553>

МЕТОД ПЕРЕТВОРЕННЯ МОНОЛІТНОЇ АРХІТЕКТУРИ FRONT-END ДОДАТКУ НА МІКРОФРОНТЕНДИ

Вебсистеми існують давно і їх створено досить багато. В сучасній розробці використовуються нова архітектура мікросервісів для підвищення продуктивності, переносимості та інших важливих характеристик. Це зумовлює необхідність трансформації застарілих систем від монолітної архітектури до мікросервісної. Процес трансформації складний і дорогий, тому удосконалення методів перетворення старих систем на нову платформу є актуальним. Це дослідження спрямоване на розробку методу трансформації для монолітних односторінкових програм (SPA). У статті запропоновано метод трансформації архітектури програмної системи від монолітної до мікросервісної архітектури (MSA). Оскільки розглядається клієнтська частина системи, пропонується термін мікрофронтенд, як аналог мікросерверів у серверній частині програмних систем. Зроблено короткий огляд існуючих досліджень реінжинірингу архітектури та визначено переваги мікросервісного підходу. Запропонований метод з трьох етапів відрізняється від інших методів виділенням додаткового етапу перетворення, що дозволяє м'яко змінювати зв'язки між частинами монолітного додатку, які були реалізовані в початковій монолітній архітектурі. Перший етап – реверс-інжиніринг, пропонується перенести фокус з пошуку застарілого коду на функціональний аналіз програми як такої. На другому етапі пропонується перехід до модульної архітектури з виділенням функціоналу в окремі модулі. Наприкінці третього етапу ми маємо кілька окремих програм (мікроінтерфейсів), які підключаються до основної програми. Експеримент із типовим зовнішнім SPA демонструє роботу запропонованого алгоритму. Система, що отримана в результаті трансформації, порівнюється з вихідною за такими вимірюваними параметрами: час створення виробничих збірок, розмір основного пакету, що надсилається в браузер, та середній час завантаження першої сторінки. Усі порівняння показали переваги системи, отриманої в результаті перетворення. У результаті алгоритм трансформації архітектури дозволяє отримати кращий результат, враховуючи обмеження інтерфейсного SPA.

Ключові слова: інформаційна система, архітектура програмного забезпечення, алгоритм, монолітна модель інформаційної системи, процес розробки програмного забезпечення, міграція програмного забезпечення, мікросервісна архітектура, односторінковий додаток, метод перетворення на мікроінтерфейси.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Нікуліна Олена Миколаївна, Nikulina Olena Mykolaivna

Автор 2 / Author 2: Хасько Кирило Олександрович, Khatsko Kyrylo Olexandrovych

M. O. ZACHEPYLO, Postgraduate Student at the Department of Information Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: Mykhailo.Zachepyllo@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6410-5934>

O. H. YUSHCHENKO, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D), Professor, Full Professor at the Department of Information Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: A.G.Yushchenko@ntu.kharkiv.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0078-3450>

THE SCIENTIFIC BASIS, SOME RESULTS, AND PERSPECTIVES OF MODELING EVOLUTIONARILY CONDITIONED NOOGENESIS OF ARTIFICIAL CREATURES IN VIRTUAL BIOCENOSES

This research aimed to gain a profound understanding of virtual biocenoses intricate digital ecosystems, with the goal of elucidating and replicating the emergence and evolution of intelligence in artificial creatures – referred to as noogenesis. A comprehensive analysis of existing studies within virtual biocenoses was undertaken to glean valuable insights into the complexities of modeling dynamic ecosystems where artificial agents engaged in intricate interactions. The pivotal role of neural networks in shaping the adaptive behaviors of artificial creatures within these environments was underscored. A meticulous investigation into neural networks' evolution methodologies revealed the evolution of their architecture complexity over time, culminating in the facilitation of flexible and intelligent behaviors. However, a lack of study existed in the domain of nurturing evolutionary-based communication and cooperation capabilities within virtual biocenoses. In response to this gap, a model was introduced and substantiated through simulation experiments. The simulation results vividly illustrated the model's remarkable capacity to engender adaptive creatures endowed with the capability to efficiently respond to dynamic environmental changes. These adaptive entities displayed efficient optimization of energy consumption and resource acquisition. Moreover, they manifested both intellectual and physical transformations attributed to the evolution and encoding principles inspired by the NeuroEvolution of Augmented Topologies. Significantly, it became apparent that the evolutionary processes intrinsic to the model were inextricably linked to the environment itself, thus harmonizing seamlessly with the overarching goal of this research. Future research directions in this field were outlined. These pathways provided a foundation for further exploration into the evolution of artificial creatures in virtual biocenoses and the emergence of advanced communication and cooperation capabilities. These advancements hold the potential to move artificial life and artificial intelligence to new levels of understanding and capability.

Keywords: agent-based modeling, artificial life, artificial intelligence, growing neural networks, evolution, noogenesis, evolutionary design.

Introduction. In the dynamic landscape of modern science and technology, the study of biocenoses, complex ecological communities recreated within virtual environments where artificial agents interact, holds profound significance. These virtual ecosystems mirror the intricate interplay observed in natural habitats and serve as the backdrop for the process of noogenesis modeling – the emergence and development of intelligence and knowledge. Understanding and harnessing the mechanisms underlying intelligence within these virtual biocenoses have implications in various domains and applications.

Artificial agents, ranging from autonomous entities to coordinated swarms, have permeated diverse fields, including research, business practices, and creative arts. Within the realm of Artificial Life, notable simulations like PolyWorld [1] and EcoSim [2] employ virtual agents to model the evolution of digital organisms within dynamic 3D environments, emulating aspects of natural ecosystems. These simulations have paved the way for exploring the evolution of intelligent behaviors and complex interactions among artificial entities.

Neural Networks have emerged as a powerful model for controlling agents, enabling them to exhibit advanced and unpredictable behaviors. Crucially, the control of such agents often involves machine learning techniques, with a primary focus on reinforcement learning. This versatility is evident in various applications, from generating nuanced non-verbal facial expressions synchronized with agent speech [3] to orchestrating intricate team dynamics in competitive video games against professional human players [4].

Furthermore, within the realms of artificial intelligence and evolutionary algorithms, the concept of "Evolutionary design" has gained prominence. This approach, rooted in the principle of gradual cost function complication reminiscent of natural evolutionary processes, offers a systematic means to synthesize and optimize intricate systems [5, 6]. The article [6] proposes to use an evolutionary approach to the design of multi-tier filters for a new generation of radio-telecommunication systems for ultra-high-speed and ultra-wideband information transmission. The essence of the method is to replace traditional multi-parameter optimization of a complex structure with evolutionary optimization of previous, more superficial structures. It allows us to find global extrema on a limited number of optimization parameters and use them as initial ones for optimizing subsequent increasingly complex descendant structures with a more significant number of parameters. Methodologically, this is an alternative approach to the design of complex systems, regardless of their nature, based on the principles of evolution from the simplest forms. Our study of virtual biocenoses from these positions will make it possible in the future to formulate general methodological principles of such evolutionary design.

In the context of advancing technology and scientific inquiry, the study of biological evolution through virtual models stands as a critically important endeavor. These studies provide valuable insights that enhance our understanding of intelligence and offer the potential for innovative applications and interdisciplinary solutions. This paper embarks on a rigorous exploration, analysis, and

© Zachepyllo M. O., Yushchenko O. G., 2023



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under a Creative Commons [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



expansion of knowledge within virtual biocenoses. We are going to elucidate the mechanisms underpinning evolutionary-based communication and cooperation capabilities.

Goals of the study. To analyze existing models incorporating biological evolution, the use of neural networks for controlling virtual agents, and the evolution of neural networks influenced by genetic factors. Through comparative analysis, we aim to provide a comprehensive overview of the current state of research, highlighting both achievements and limitations.

Build a basic model of artificial creature evolution in virtual biocenose capable of further complexification. Study its capability to model the evolution process.

To investigate the intricate interplay among evolutionary theory, artificial neural networks, and the design of virtual agents within simulated environments, specifically focusing on the emergence of communication, socialization, and intelligence.

Furthermore, to establish a conceptual framework for an innovative evolutionary design approach applied to developing creatures and their intelligence within virtual biocenoses. Drawing insights from evolutionary biology, neural network control, and artificial life systems, we aim to pave the way for novel methodologies that promote the emergence and growth of intelligence in artificial ecosystems.

Models of biological evolution. Darwin and Wallace's theory is the bedrock of contemporary evolutionary models, elucidating the principles of variation, selection, and heredity [7]. These principles have given rise to various computational paradigms aimed at replicating these processes in simulated virtual reality.

Genetic Algorithms (GAs) Introduced by John H. Holland [8], GAs are optimization and search techniques emulating genetic variation and selection. GAs maintains candidate solution populations, favoring fitter individuals through selection pressure while preserving diversity via recombination and mutation. GAs finds applications in complex optimization problems, machine learning, and evolutionary design.

Genetic Programming (GP), as an extension of GAs, GP evolves computer programs and algorithmic structures [9]. These programs are represented as trees and undergo genetic operations like crossover and mutation. GP is utilized in automated program generation, symbolic regression, and diverse problem-solving domains.

Artificial Life (ALife) is an interdisciplinary field introduced by Langton in the 1990s [10, 11] that focuses on emulating lifelike behaviors, patterns, and systems within computational environments. It employs evolutionary concepts to simulate lifelike behaviors, exploring self-organization, emergence, and adaptation. Typical tools in ALife include cellular automata, agent-based simulations, and virtual ecosystems.

Valentin Turchin's Theory of Metasystem Transitions introduces a modern outlook on complex system evolution [12]. This theory suggests that systems can progress to higher organizational levels through a series of transitions, each marked by the emergence of new control mechanisms at a higher level. It extends the concept of evolution beyond

genetics and biology to encompass control hierarchies and metasystems.

Incorporating these computational models and theories, our research will advance the understanding of evolutionary processes in both natural and artificial realms.

Models of biological evolution. In the realm of Artificial Life (ALife), various models have emerged, each with distinct attributes and methodologies. This review offers a comparative analysis of these models, focusing on key features like neural networks, learning, topology evolution, encoding, environment, and communication and cooperation capabilities.

Early ALife models, pioneered by Langton [10, 11], centered on principles of cellular automata to study self-organization and basic lifelike patterns. These models lacked complexity and adaptability.

Tierra by Thomas Ray introduced self-replicating computer programs [13], delving into the evolutionary dynamics of digital code within computational environments. Though devoid of neural networks, it marked progress in illustrating the evolution in digital systems. Inspired by Tierra, Avida [14] featured organisms as code segments in a 2D grid. It exhibited self-replication through mutations and local interactions. Communication was limited to the local neighborhood, fostering diversity. Avida supported genetic encoding, dynamic topology evolution, and Poisson-random mutations but operated in a simplified digital environment.

Larry Yaeger's PolyWorld [15] expanded the horizons of ALife by simulating 3D artificial creatures, each under the control of evolving neural networks. Notably, PolyWorld leverages evolving neural networks as the cognitive substrate for its virtual organisms, fostering dynamic topological changes in network architecture as a result of natural selection. These networks serve as the neural underpinning for various learning methods and behaviors exhibited by artificial organisms. Encoding in PolyWorld is grounded in software-coded genetics, and the environment is structured to accommodate predation, mimicry, sexual reproduction, and communication, rendering it a complex and competitive ecological crucible. The communication and cooperation abilities of the agents within this environment give rise to emergent behaviors, as their actions are shaped by individual survival strategies and group dynamics. In essence, PolyWorld is a noteworthy platform where neural networks, learning methods, topology evolution, encoding, environmental characteristics, and communication abilities intersect to explore the dynamics of evolving digital lifeforms. Since PolyWorld is a simulated 3D environment, it allowed agents to receive a sensory input based on image and color sensors as an input for a neural network agent control center. The communication is limited by signaling via agent color changing. The study focuses on successful survival strategies and has a static genome size, which limits neural network topology complexity. That limits its ability to simulate meta-system transition and observability of evolution.

Framsticks [16, 17] featured artificial creatures constructed from stick-like components, aiming to simulate creature-environment interactions in a highly configurable 3D

environment. At the same time, it had limitations in topology evolution and communication.

EcoSim [2] introduced an individual-based predator-prey model employing Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) for agent behavior modeling. It allowed agents to assess their environment and evolve unique FCMs. EcoSim incorporated species concepts and provided insights into macro-evolutionary processes. However, predefined agent behaviors limited innovation.

Summarizing these studies achieved behavior similar to biological natural objects at some scale focusing on different aspects. Only PolyWorld and Framsticks utilize agent control on neural-based or neural network approaches. Learning strategies vary from clearly evolutionary-based to Hebbian-learning in PolyWorld, which enables behavioral difference even in agents with identical phenotypes. Models utilize different environments, from purely static in Tierra, Avida, and EcoSim, to static but a highly per-session configurable environment with limited resources in PolyWorld and Framsticks. The mentioned studies do not have a highly dynamic environment that evolves with the population, gradually increasing the complexity and driving the population to open-ended evolution. None of the mentioned studies utilize the potentially infinitely growing and adapting neural network separately but in sync with the creature's body to enable the possibility of meta-system transition in the context of the evolutionary progression of artificial creatures.

Core challenges in evolutionary modeling of virtual biocenoses. The endeavor to model virtual biocenoses encompassing artificial life forms unveils a spectrum of intricate challenges that merit meticulous consideration within the scientific discourse. In this section, we explore these core challenges, delving into the complexities underpinning virtual ecosystems' evolutionary modeling.

- **Genetic Encoding of Phenotypes and Structural Congruence.** Central to the efficacy of evolutionary modeling lies the genetic encoding of phenotypes and the alignment between an organism's physical structure and its neural architecture [18]. This alignment, sometimes involving pruning mechanisms, necessitates meticulous design to ensure that the neural system accurately embodies the intended physical attributes.

- **Stability of Evolution and Preservation of Useful Innovation.** Sustaining the stability of evolution while safeguarding opportunities for innovation presents a multifaceted challenge. It includes the study of neuro complexification, a process vital in preventing the population from becoming entrenched in local optima or succumbing to collapse within highly intricate environmental settings [19].

- **Environmental Complexity and Neural Network Elaboration.** The environment in which virtual biocenoses evolve plays a pivotal role in shaping the complications and elaboration of neural networks. Understanding the environmental conditions that give rise to neural complexity is crucial for comprehending the dynamics of artificial life systems.

- **Lifelong Learning or Open-Ended Evolution.** Enabling virtual organisms to engage in lifelong learning is imperative for facilitating open-ended evolution. This approach prevents populations from stagnating within minimal optima and bolsters adaptability, even in dynamic and intricate environments. Notable contributions from researchers such as Larry Yaeger, Tim Taylor, L. B. Soros, Kenneth O. Stanley, Rui Wang, Joel Lehman, Jeff Clune, and Jonathan C. Brant have illuminated pathways in this regard [20–25].

- **Environmental Prerequisites for Communication and Socialization.** Formulating artificial agents' communication and socialization behavior hinges on understanding the environmental prerequisites that foster these intricate interactions.

These insights underscore the need for careful consideration of genetic encoding methods, the role of environmental complexity in shaping neural networks, and the importance of lifelong learning mechanisms in evolutionary systems. Addressing these challenges will be essential for advancing the modeling of virtual biocenoses and understanding the emergent behaviors of artificial life forms.

Neural networks that control agents and other virtual objects. In the ever-evolving realm of artificial intelligence and virtual environments, neural networks (NNs) have become pivotal in controlling virtual entities across various applications.

Karl Sims utilized Recurrent Neural Networks (RNNs) to evolve virtual creatures' neural systems [26]. Focused on morphology and sensory input, it excelled in single-agent environments, primarily for applications in gaming.

Non-verbal facial behaviors in virtual agents using Generative Adversarial Networks (GANs) and RNNs with Long Short-Term Memory (LSTM) cells were studied in [3] – the training process involved supervised learning, resulting in realistic facial expressions for gaming and cinematography.

The research emphasized energy-efficient control for mobile agents, employing fully connected spiking neural networks and Spike-Timing-Dependent Plasticity (STDP)-based unsupervised learning [27]. Promising for autonomous mobile agents, it showcased energy-efficient control mechanisms.

Exploring multi-agent scenarios, this study investigated the emergence of tool use behaviors [28]. It employed fully connected RNNs with LSTM cells and Reinforcement Learning (RL), promoting competition and coordination among agents. It is vital for gaming, where tool use behaviors are crucial.

RNNs with LSTM cells facilitated infant agents' learning from parent agents in a virtual 3D environment [29]. RL drove interaction, revealing the potential for virtual agents to exhibit curiosity-driven behaviors and engage in social interactions.

Convolutional Neural Networks (CNNs) and RNNs with LSTM cells to control a robot hand solving a Rubik's Cube studied in [30]. Although single-agent, it hinted at robotics and automated problem-solving applications.

Using Graph Neural Networks (GNNs), the study trained control admissibility models with spatial data [31]. RL methodologies were applied, promising applications in the enterprise, robotics, and complex environments.

Investigated the emergence of maps within 'blind' AI navigation agents' memories [32]. RNNs with LSTM cells utilized GPS, compass, and touch sensor data – valuable insights into spatial cognition development.

Achieved performance enough to beat the team of professional players in the Dota 2 video game through self-play reinforcement learning [4]. RNNs with LSTM cells controlled agents, facilitating multi-agent interactions within the gaming domain.

In summary, NNs are pivotal in controlling virtual entities across diverse applications. From evolutionary algorithms to GANs, these studies contribute to gaming, cinematography, autonomous agents, virtual software agents, robotics, and more. A common theme is the single-agent focus, suggesting opportunities for exploring multi-agent interactions and collaborations. Additionally, when applying to NN, Evolution Strategies could surpass RL in certain aspects, offering avenues for future research [33].

Evolving Neural Networks under the Influence of Genetic Operators. In the dynamic fields of artificial intelligence and evolutionary computation, the evolution of neural networks under the influence of genetic operators has emerged as a captivating and highly promising research frontier, finding applications in various domains, including robotics and gaming.

Carl Sims' pioneering work [26] centers on the evolution of virtual creatures within physical environments. Neural networks govern creature behavior and undergo coevolution with creature morphological structures through genetic algorithms. This approach has implications for embodied AI, particularly in evolving robots with adaptable neural control systems.

The NeuroEvolution of Augmenting Topologies (NEAT) algorithm [34] refines neural network structures iteratively across generations. NEAT preserves population diversity, making it versatile for domains like robotics and gaming. It introduces principled crossover, speciation, and incremental growth, providing expedited learning and insights into the evolution of increasingly intricate solutions. NEAT serves as a cornerstone in the continuum of neural network evolution methodologies, establishing a framework for subsequent advancements in this evolving field, leading to more than 61 extensions [35]. Real-Time NEAT (rtNEAT) [36] empowers neural networks to adapt continuously to changing conditions in real-time environments, ideal for autonomous robotics and adaptive game AI. rtNEAT creates a new genre of video games, enabling evolving and adapting agents during gameplay. HyperNEAT [37] and the following ES-HyperNEAT [38] focus on evolving neural networks with the capacity for dynamic behaviors. It employs generative encoding, connective compositional pattern-producing networks (CPPNs), and hypercube-based NeuroEvolution of Augmenting Topologies (HyperNEAT) to optimize neural networks controlling agents with intricate morphologies and behaviors. The Coevolution of Brain and Morphology in Robotics (NEAT-M) [39] explores the concurrent

evolution of robot structures and neural control systems. Genetic algorithms optimize both, leading to adaptive robots, significantly impacting embodied AI within robotics and autonomous systems. CoDeepNEAT extends NEAT's principles to evolve architectures tailored for deep networks, making it vital in domains relying on deep learning.

These studies collectively advance neural network evolution, showcasing their effectiveness in optimizing architectures for various tasks and understanding the interplay between neural networks, morphologies, and behaviors. However, computational complexity and the need for multi-agent exploration remain challenges, leaving room for further research. Furthermore, while the mentioned investigations excel in single-agent scenarios, there is room for further exploration of multi-agent interactions and collaborations. Many mentioned investigations primarily focus on single-agent environments, leaving untapped potential in domains requiring coordination among multiple agents.

Our Approach. In the realm of artificial intelligence and the emergence of intelligence, a significant research gap exists in the domain of lifelong evolution applied to multi-agent open problems. This void encompasses scenarios where creatures can undergo intellectual and physical transformations through NEAT-inspired evolution and encoding mechanisms. Specifically, these transformations target the facilitation of communication and socialization among creatures. Moreover, this model is unique because it drives evolution and selection processes primarily through interactions with the environment, without external algorithmic control.

To better comprehend the core principles of artificial intelligence and how intelligence evolves, there is a need for a significant shift in focus. Instead of emphasizing complex models, we should start with basic models, gradually evolving them into more sophisticated structures [6]. This approach promises to offer deeper insights into the fundamental principles governing intelligence and its development.

Model Overview. The proposed model logically continues the previous study [40] and operates within a 2D spatial environment possessing finite dimensions. Within this environment reside creatures, each comprising two integral components: a physical body and a control center represented by a neural network. The foundational structure of a creature's physical body takes the form of a circle. Additionally, creatures can be equipped with sensors to perceive environmental information and effectors to enact various actions, including movement and rotation. The neural network of each creature serves as the interface between sensory inputs and motor outputs.

Genetic Encoding. The model encodes creatures' physical attributes and their neural networks within their respective genomes. Inspired by NEAT [34], this encoding encompasses the topology and assignment of weights of the neural network, all meticulously derived from the genetic information contained within the creature's single genotype. The critical update was to add specific types of nodes representing the different physical attributes, such as sensors and effectors. Similar updates were made in [39].

The genetic encoding of creatures is captured as a genome, denoted as G , which consists of genes representing various attributes of the creature. Each gene is represented as a tuple (I, T, V) , where I denotes the innovation number, T denotes the gene type, and V represents the value associated with that gene, its role is different for each gene type. The gene type T encompassed within the genome includes:

- food_sensor (**FS**): Represented as (I, FS, PL) , where PL represents the placement of the sensor within the creature's circular body.

- wall_sensor (**WS**): Represented as (I, WS, PL) , with the same attributes as food sensors.

- bot_sensor (**BS**): Represented as (I, BS, PL) , with the same attributes as food sensors.

- energy_sensor (**ES**): Represented as (I, ES) , value is not used for **ES**.

- neural_node (**NN**): Represented as (I, NN, AF) , where AF signifies the activation function applied within the neural node $AF \in \{\text{sigmoid}, \text{tanh}, \text{relu}\}$. The neural node does not have its own bias.

- movement_effector (**ME**): Represented as (I, ME, RV) , where RV indicates the movement effector's reactivity value.

- rotation_effector (**RE**): Represented as (I, RE, RV) , where RV indicates the rotation effector's reactivity value.

- neural_connection (**NC**): Represented as $(I, NC, (F, T, W))$, F denotes the source neural node, T represents the target neural node, and W signifies the weight of the connection.

- creatures_body_node (**CBN**): Represented as (I, CBN, SZ) , where SZ indicates the size of the creature's main circular body. This node cannot establish a neural connection.

So $T \in \{FS, WS, BS, ES, NN, ME, RE, NC, CBN\}$. Innovation number I is a global counter that helps track gene history [34] while not playing the role of crossover in this model.

Mutation Mechanisms. Define the mutation process M as a stochastic function that takes as input a creature's genotype G and returns a modified genotype G' ,

$$M : G \rightarrow G'. \quad (1)$$

Mutation could be different $MT \in \{\text{AddNode}, \text{AddConnection}, \text{RemoveGen}, \text{UpdateGen}\}$. It is picked randomly, $X_{mt} \sim \text{Weighted}(MT, W_{mt})$, where X_{mt} is a picked mutation type, W_{mt} is a weighted probability for each possible type, which is a hyperparameter for the current model. When $X_{mt} = \text{AddNode}$, the type of node picked randomly between available types $X_{nt} \sim \text{Weighted}(T, W_{nt})$, where X_{nt} is a picked node type, W_{nt} is a weighted probability for each possible type, which is also a hyperparameter for the current model. The additional **NC** is also being added: 1 for sensors and effectors and 2 for **NN**. When two random connectable nodes within the whole genotype are picked, and two connections are created between them with random coefficients to reduce the initial impact of newly connected

nodes, the maximum weight of the connection is limited to 0.5. When $X_{mt} = \text{UpdateGen}$, the random gen is picked from the genotype, and its associated value is randomly changed. When $X_{mt} = \text{AddConnection}$, two random connectable nodes within the creature genotype are being picked, and a connection between them is being created with random weight also upper limited to 0.5 for reduction of initial impact which enhance population stability as previous experiments shown, recurrent connections are allowed. When $X_{mt} = \text{RemoveGen}$ mutation occurs, the random gen is selected and removed. If it is a node with some connections, all related connections are also being removed. Since the current model uses clonal replication, there is no need to preserve disabled nodes for further crossover operation like in the original NEAT approach [34].

Sensory and Motor Capabilities. Creatures are equipped with limited-length ray sensors, the placement and object type reactivity of which are encoded within the creature's genotype. These sensors can detect objects such as obstacles, food sources, and other creatures. They activate on the range $[0, 1]$. The closer the intersection to the source of the ray, the higher the activation, zero, when there is no intersection. The energy sensor is not represented as physical and activates with the amount of the creature's energy. Creature effectors encompass actions for movement (forward propulsion) and rotation. If a creature has several movement and rotation effectors, their effect is summarized.

Simulation Setup. The simulation is initialized with a carefully constructed set of conditions. The initial population of creatures is introduced into the 2D spatial environment, and their placement within this environment is randomized to ensure spatial diversity. Each creature in the initial population possesses a minimal genetic structure, including essential basic functionality components. These components consist of one food sensor, an energy sensor, a neural node, and movement and rotation effectors. The connections between these elements are initialized with random weights, giving the creatures a degree of variability in their initial behaviors. The sample for the initial creature phenotype is shown in fig. 1 a–b. Each one is also given the introductory amount of energy to survive for the first time. Additionally, food resources are distributed randomly across the environment. These food sources serve as vital sustenance for the creatures, motivating them to explore and interact with their surroundings. The random placement of food resources introduces an element of uncertainty and competition, driving the creatures to adapt and develop diverse foraging strategies. Wall-like obstacles are strategically positioned at random locations within the environment. These obstacles create physical barriers that creatures must navigate around, adding complexity to their interactions with the environment and fostering the development of obstacle-avoidance behaviors.

Simulation Dynamics. The simulation proceeds in discrete time intervals referred to as ticks. It initiates with a population of creatures, accompanied by randomly distributed obstacles and food sources within the environment. Creatures possess an energy resource that is

expended as they perform actions over time. Creatures whose energy reserves deplete below a critical threshold die. During each simulation tick, sensor activations are conveyed through the creature's neural network, subsequently dictating actions based on effector activations. Creatures can restore their energy by colliding with and collecting food sources. When a creature's energy surpasses a predefined threshold, it creates an offspring using clonal reproduction with a mutated parent's genotype using (1), transferring half of its own energy to this offspring. The model incorporates the cyclical introduction of food resources into the environment at specified intervals. These intervals are governed by a food restoration schedule encompassing high and low food influx periods. Additionally, obstacles are strategically repositioned at periodic intervals, and how will be shown in future studies – fostering speciation and innovative adaptations among creatures. This environmental dynamism serves to shuffle ecological niches, engendering competition among creatures for limited resources.

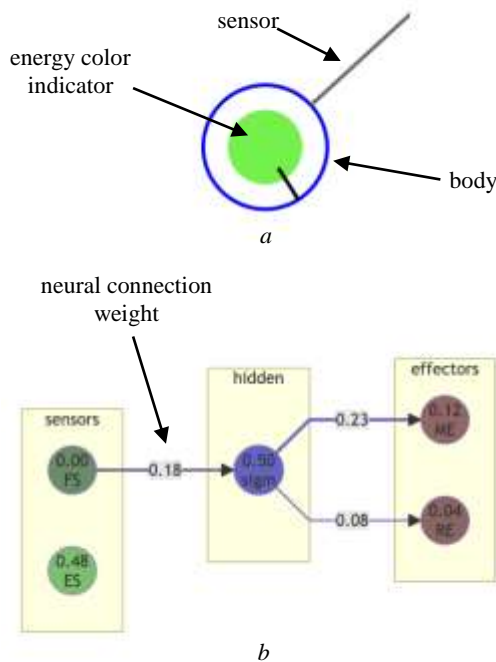


Fig. 1. Sample initial artificial creature phenotype:
a – in environment, b – its neural network

In this model, the creatures' primary objective is the population's survival, achieved through personal survival and the generation of offspring. The population, as a whole, can progress towards this objective through mutations that allow enhanced adaptability to the environment. In addition to the base model [40], this version introduces several enhancements, including support sensors for obstacle and bot detection, recurrent connections in the hidden layer, food seasoning, random wall placement, energy sensing, and an energy penalty associated with genotype size. This model was implemented as simulation software and subjected to a series of experiments for study and analysis.

Results. Emergence of Adaptive Agents. The model presented in this study effectively demonstrated the emergence of adaptive agents within virtual biocenoses. These agents displayed the capacity to respond to dynamic changes in their environment over successive simulation intervals. These agents evolved strategies through evolutionary processes that enabled them to proficiently acquire food resources while efficiently managing their energy levels.

Emerged behaviors. For several experiments, artificial creatures have embraced different behaviors, including seeking food by forward or circular movements, reducing movement to save energy and prolong life, detecting obstacles and turnaround from them, detecting bots around, and increasing speed to win in local competition for a food resource. This model enables creatures to develop a variety of strategies. In several experiments, most of the population developed a strategy to rotate in place and wait for food to appear in their field of sensitivity, as soon as they notice it, they move forward as fast as possible. This strategy is similar to the one in saying by Confucius, "If you sit by the river long enough, the bodies of your enemies will float by".

Metasystem Transitions. In several experimental instances, we observed intriguing phenomena characterized by metasystem transitions [40]. These phenomena require an additional investigation into the underlying preconditions that triggered such transitions.

Evolutionary Trends in Neural Network Complexity. Our experimental findings unveiled a captivating trend in the evolutionary dynamics of neural networks within virtual biocenoses, as illustrated in fig. 2, a. fig. 2, b provides a visual representation of a creature within the simulated environment. Initially, there was a noticeable growth in the size and complexity of these neural networks, possibly driven by the pursuit of heightened cognitive capabilities. However, a remarkable adaptation emerged during the course of our simulations. Artificial agents within the system, when confronted with the increased energy consumption associated with larger genotype sizes, exhibited a strategic shift towards evolving more compact neural networks, fig. 2, a. This adaptation appeared to be a deliberate response aimed at conserving energy resources while simultaneously maintaining a degree of variability within the agent population. Since nodes in creatures' neural networks do not have bias, they emerged that the energy sensor is adaptive bias, and the hidden neural node with sigmoid activation function became static bias due to the nature of this function. These results underscore the dynamic and context-sensitive nature of evolution within artificial environments, highlighting the innovative strategies employed by virtual agents to optimize their cognitive resources while preserving population diversity.

Genotype evolution dynamics displayed a trend in controlled genotype growth with dominance of genes represented neural links as shown in fig. 3. Biocenose state over simulation displayed the rapid population size growth. At the same time, initial resources were highly available. The population sought an adaptation to limited food resources per creature and reached near equilibrium plateau for a given environment near tick 10^6 as shown in fig. 4.

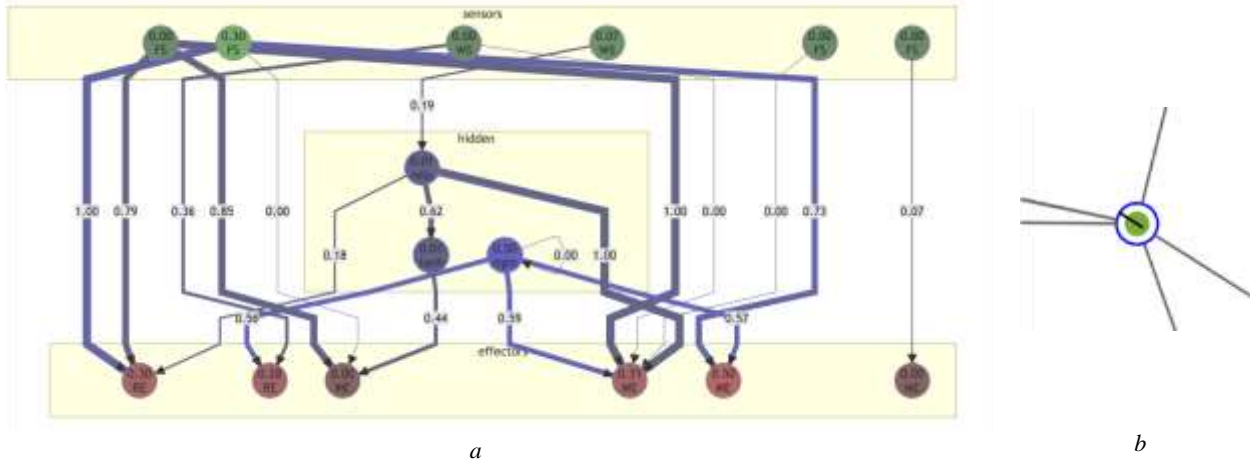


Fig. 2. Artificial creature phenotype, generation 2888, simulation tick 10^7 :
 a – its neural network, b – its body in the environment

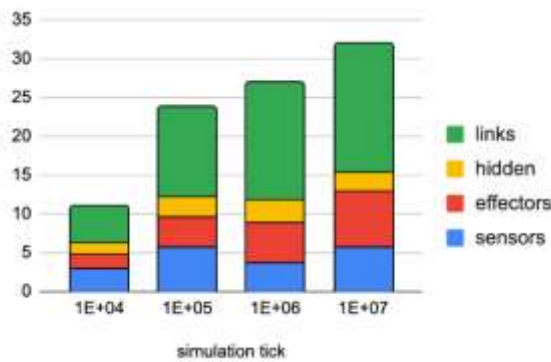


Fig. 3. Distribution of gene types amount, average in population genotypes over simulation time

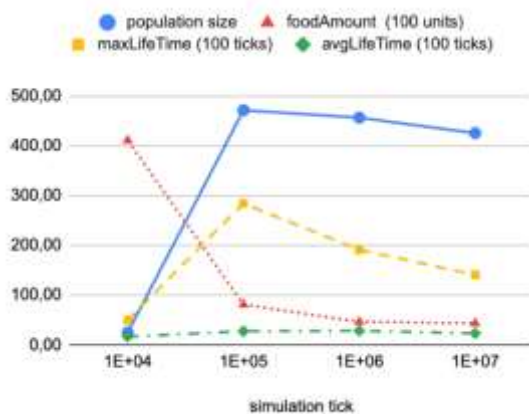


Fig. 4. Simulation dynamics of biocenose

Conclusions. While acknowledging the valuable contributions of previous studies, it is essential to note that some of these endeavors have leaned towards employing complex models within static environments.

Furthermore, some of these investigations have primarily focused on locomotion movement patterns development as a separate issue, which may have diverted their

attention from the broader context of communication and socialization processes within artificial environments.

Modeling the evolution of artificial life's simplest form will allow investigation of the emergence and development of intellect, in contrast to complex models primarily constrained to study strategies. Attaining this understanding can be facilitated by gradually increasing model complexity as it is required for evolving neural networks. The complexification could be both in creatures' potential abilities and environment influence them.

The interest in modeling the emergence of communication and socialization is in exploring and studying the ability of evolving agents to form enough physical and neural enhancements to be able for these functions. Model potentially allows us to study social formations in the evolving agents when reflection communication could transform into a social one. It is necessary to study if unconditional, acquired features are sufficient to formulate communicational behavior or if artificial creature needs personal experience.

The proposed model creates the basis for the complexity of a virtual biocenosis, which will stimulate the progressive development of artificial life forms to increase their intellectual component. The conducted studies show that even in the simplest models, the main trends in biological evolution are observed, both metacosystem transitions of the neural network and its simplification to occupy a specific ecological niche. In the future, it will be necessary to determine the conditions for strengthening the first trend and eliminating the second.

Future research. Dynamic Environment Complexification: Building upon these results, future enhancements could involve further complexification of the environment. This might include introducing additional environmental factors or challenges to stimulate more intricate agent behaviors.

Complex Effectors and Sensors: The model's capacity to accommodate more complex effectors and sensors opens doors for research into advanced agent capabilities, potentially leading to more sophisticated communication and socialization.

To study the ability to apply evolutionary design in gaming (Video Games), cinematography, and business, as well as research in AI, communication, and socialization. The perspective of applying this approach is based on the fact that it is too hard to create complex virtual objects in perfect form directly. Evolutionary design could offer a reliable possibility to grow perfect artificial creatures from simplest to target environments where they can act for business needs.

References

1. Yaeger L. Computational genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behavior or Poly World: life in a new context. *Santa Fe institute studies in the sciences of complexity – proceedings volume*. 1994. Vol. 17, P. 263–263.
2. Gras R., Devaurs D., Wozniak A., Aspinall A. An individual-based evolving predator-prey ecosystem simulation using a fuzzy cognitive map as the behavior model. *Artificial life*. 2009. Vol. 15, no. 4. P. 423–463.
3. Delbosch A., Ochs M., Ayache S. Automatic facial expressions, gaze direction and head movements generation of a virtual agent. *Companion Publication of the 2022 International Conference on Multimodal Interaction*. 2022. P. 79–88. DOI: 10.1145/3536220.3558806.
4. Berner C., Brockman G., Chan B., Cheung V., Debiak P., Dennison C., Farhi D., Fischer Q., Hashme S., Hesse C., Józefowicz R., Gray S., Olsson C., Pachocki J., Petrov M., Pinto H. P. d.O., Raiman J., Salimans T., Schlatter J., Schneider J., Sidor S., Sutskever I., Tang J., Wolski F., Zhang S. *Dota 2 with large scale deep reinforcement learning / OpenAI*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.06680> (date of access: 29.08.2023).
5. Yushchenko A. G., Volkova N. A., Teslenko A. A., Petrova K. R. Recursive genetic algorithm for solving the traveling salesman problem.. *Anniversary edition of "Information Systems" department at NTU "KhPI"*. Kharkiv. 2014. P. 154–162. URI: <https://www.researchgate.net/publication/262686057> (date of access: 29.08.2023).
6. Yushchenko A. G., Mamedov D. Evolutionary design of seven-tier LM-mode filters optimized with original knowledge-based CAD system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: technique and electrophysics of high voltage*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No. 21 (1064), P. 159–170.
7. Darwin C. *On the origin of species: or the preservation of the favoured races in the struggle for life*. Read Books Ltd, 2018.
8. Holland J. H. *Adaptation in natural and artificial Systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press, 1992. 232 p.
9. Koza J. R. *Genetic programming: a paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. Stanford: Stanford University, 1990. 127 p.
10. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata. *Physica D: nonlinear phenomena*. 1986. Vol. 22. P. 120–149. DOI: 10.1016/0167-2789(86)90237-X.
11. Langton C. G. *Artificial life, volume I: proceedings of an interdisciplinary workshop on synthesis and simulation of living systems*. Netherlands: Avalon Publishing, 1989. 655 p.
12. Turchin V. A dialogue on metasystem transition. *World futures*. 1995. Vol. 45, no. 1–4. P. 5–57. DOI: 10.1080/02604027.1995.9972553.
13. Ray T. S. *Evolution, ecology, and optimization of digital organisms*. Santa Fe, 1992. 47 p.
14. Adami C., Brown C. T. Evolutionary learning in the 2D artificial life system. *Artificial life IV: proceedings of the fourth international workshop on the synthesis and simulation of living systems*. 1994. Vol. 4. P. 377–382.
15. Yaeger L. Computational genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behavior of Poly World: life in a new context. In *Santa Fe institute studies in the sciences of complexity – proceedings volume*. 1994. Vol. 17. P. 263–288.
16. Komosiński M., Ulatowski S. Framsticks: towards a simulation of a nature-like world, creatures, and evolution. *European Conference on Artificial Life*. Heidelberg, 1999. P. 261–265.
17. Adamatzky A. Framsticks. *Kybernetes*. 2000. Vol. 29, no. 9/10. DOI: 10.1108/k.2000.06729iad.001.
18. Veenstra F., Glette K. How different encodings affect performance and diversification when evolving the morphology and control of 2D virtual creatures. *ALIFE 2020: the 2020 conference on artificial life*. Cambridge: MIT Press, 2020. P. 592–601.
19. Yaeger L. S., Sporns O. Evolution of neural structure and complexity in a computational ecology. In *artificial life X: proceedings of the tenth international conference on the simulation and synthesis of living systems*. 2006. P. 330–336.
20. Yaeger L. S. How evolution guides complexity. *HFSP journal*. 2009. Vol. 3, no. 5. P. 328–339. DOI: 10.2976/1.3233712.
21. Yaeger L. S., Griffith V., Sporns O. *Passive and driven trends in the evolution of complexity*. URL: <https://arxiv.org/abs/1112.4906> (date of access: 29.08.2023).
22. Taylor T. *Requirements for open-ended evolution in natural and artificial systems*. URL: <https://arxiv.org/abs/1507.07403> (date of access: 29.08.2023).
23. Soros L. B., Stanley K. O. Identifying necessary conditions for open-ended evolution through the artificial life world of Chromaria. In *artificial life 14: proceedings of the fourteenth international conference on the synthesis and simulation of living systems*. 2014. P. 793–800. DOI: 10.7551/978-0-262-32621-6-ch128.
24. Wang R., Lehman J., Clune J., Stanley K. O. *Paired open-ended trailblazer (POET): endlessly generating increasingly complex and diverse learning environments and their solutions*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.01753> (date of access: 29.08.2023).
25. Brant J. C., Stanley K. O. Minimal criterion coevolution: a new approach to open-ended search. In *GECCO '17: proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*. 2017. P. 67–74. DOI: 10.1145/3071178.3071186.
26. Sims K. Evolving virtual creatures. In *proceedings of the 21st annual conference on computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH' 94)*. New York. 1994. P. 15–22. DOI: 10.1145/192161.192167.
27. Putra R. V. W., Shafique M. *TopSpark: a timestep optimization methodology for energy-efficient spiking neural networks on autonomous mobile agents*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.01826> (date of access: 29.08.2023).
28. Baker B., Kanitscheider I., Markov T., Wu Y., Powell G., McGrew B., Mordatch I. *Emergent tool use from multi-agent auto-curricula*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1909.07528> (date of access: 29.08.2023).
29. Doyle C., Shader S., Lau M., Sano M., Yamins D. L. K., Haber N. *Developmental curiosity and social interaction in virtual agents*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13396> (date of access: 29.08.2023).
30. Akkaya I., Andrychowicz M., Chociej M., Litwin M., McGrew B., Petron A., Paino A., Plappert M., Powell G., Ribas R., Schneider J., Tezak N., Tworek J., Welinder P., Weng L., Yuan Q., Zaremba W., Zhang L. *Solving Rubik's cube with a robot hand / OpenAI*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.07113> (date of access: 29.08.2023).
31. Yu C., Yu H., Gao S. Learning control admissibility models with graph neural networks for multi-agent navigation. In *proceedings of the 6th conference on robot learning, in proceedings of machine learning research*. 2023. P. 934–945.
32. Wijmans E., Savva M., Essa I., Lee S., Morcos A. S., Batra D. *Emergence of maps in the memories of blind navigation agents*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.13261> (date of access: 29.08.2023).
33. Salimans T., Ho J., Chen X., Sidor S., Sutskever I. *Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning*. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1703.03864> (date of access: 29.08.2023).
34. Stanley K. O., Miikkulainen R. Evolving neural networks through augmenting topologies. *Evolutionary computation*. 2002. Vol. 10, no. 2. P. 99–127. DOI: 10.1162/106365602320169811.
35. Papavasileiou E., Cornelis J., Jansen B. A systematic literature review of the successors of "NeuroEvolution of augmenting topologies." *Evolutionary computation*. 2021. Vol. 29, no. 1. P. 1–73. DOI: 10.1162/evco_a_00282.
36. Stanley K., Cornelius R., Miikkulainen R., D'Silva T., Gold A. Real-time learning in the NERO video game. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*. 2021. Vol. 1, no. 1. P. 159–160. DOI: 10.1609/aiide.v1i1.18736.
37. Stanley K. O., D'Ambrosio D. B., Gauci, J. A. Hypercube-based encoding for evolving large-scale neural networks. *Artificial life*. 2009. Vol. 15, no. 2. P. 185–212. DOI: <https://doi.org/10.1162/artl.2009.15.2.15202>.

38. Risi S., Stanley K. O. An enhanced hypercube-based encoding for evolving the placement, density, and connectivity of neurons. *Artificial life*. 2012. Vol. 18, no. 4. P. 331–363. DOI: 10.1162/ARTL_a_00071.
39. Hewland J., Nitschke G. The benefits of adaptive behavior and morphology for cooperation. In *2015 IEEE symposium series on computational intelligence (SSCI)*. 2015. P. 1047–1054. DOI: 10.1109/SSCI.2015.151.
40. Yushchenko A. G., Zachepylo M. O. *Modelling of evolutionary conditioned noogenesis of virtual biocenoses*. 2020. 10 p. (Preprint). DOI: 10.13140/RG.2.2.30785.38246.
- References (transliterated)**
1. Yaeger L. Computational genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behavior of Poly World: life in a new context. *Santa Fe institute studies in the sciences of complexity – proceedings volume*. 1994, vol. 17, pp. 263–263.
 2. Gras R., Devaurs D., Wozniak A., Aspinall A. An individual-based evolving predator-prey ecosystem simulation using a fuzzy cognitive map as the behavior model. *Artificial life*. 2009, vol. 15, no. 4. pp. 423–463.
 3. Delbosch A., Ochs M., Ayache S. Automatic facial expressions, gaze direction and head movements generation of a virtual agent. *Companion Publication of the 2022 International Conference on Multimodal Interaction*. 2022, pp. 79–88. DOI: 10.1145/3536220.3558806.
 4. OpenAI, Berner C., Brockman G., Chan B., Cheung V., Dębiak P., Dennison C., Farhi D., Fischer Q., Hashme S., Hesse C., Józefowicz R., Gray S., Olsson C., Pachocki J., Petrov M., Pinto H. P. d.O., Raiman J., Salimans T., Schlatter J., Schneider J., Sidor S., Sutskever I., Tang J., Woloski F., Zhang S. *Dota 2 with large scale deep reinforcement learning*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1912.06680> (accessed: 29.08.2023).
 5. Yushchenko A. G., Volkova N. A., Teslenko A. A., Petrova K. R. Recursive genetic algorithm for solving the traveling salesman problem.. *Anniversary edition of "Information Systems" department at NTU "KhPI"*. Kharkiv, 2014, pp. 154–162. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/262686057> (accessed: 29.08.2023).
 6. Yushchenko A. G., Mamedov D. Evolutionary design of seven-tier LM-mode filters optimized with original knowledge-based CAD system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: technique and electrophysics of high voltage*. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 21 (1064), pp. 159–170.
 7. Darwin C. *On the origin of species: or the preservation of the favoured races in the struggle for life*. Read Books Ltd Publ., 2018.
 8. Holland J. H. *Adaptation in natural and artificial Systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press Publ., 1992. 232 p.
 9. Koza J. R. *Genetic programming: a paradigm for generically breeding populations of computer programs to solve problems*. Stanford, Stanford University Publ., 1990. 127 p.
 10. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata. *Physica D: nonlinear phenomena*. 1986, vol. 22, pp. 120–149. DOI: 10.1016/0167-2789(86)90237-X.
 11. Langton C. G. *Artificial life, volume I: proceedings of an interdisciplinary workshop on synthesis and simulation of living systems*. Netherlands, Avalon Publishing Publ., 1989. 655 p.
 12. Turchin V. A dialogue on metasystem transition. *World futures*. 1995, vol. 45, no. 1–4, pp. 5–57. DOI: 10.1080/02604027.1995.9972553
 13. Ray T. S. *Evolution, ecology, and optimization of digital organisms*. Santa Fe, 1992. 47 p.
 14. Adami C., Brown C. T. Evolutionary learning in the 2D artificial life system. *Artificial life IV: proceedings of the fourth international workshop on the synthesis and simulation of living systems*. 1994, vol. 4, pp. 377–382.
 15. Yaeger L. Computational genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behavior of Poly World: life in a new context. In *Santa Fe institute studies in the sciences of complexity – proceedings volume*. 1994, vol. 17, pp. 263–288.
 16. Komosiński M., Ulatowski S. Framsticks: towards a simulation of a nature-like world, creatures, and evolution. *European Conference on Artificial Life*. Heidelberg, 1999, pp. 261–265.
 17. Adamatzky A. Framsticks. *Kybernetes*. 2000, vol. 29, no. 9/10. DOI: 10.1108/k.2000.06729iad.001
 18. Veenstra F., Glette K. How different encodings affect performance and diversification when evolving the morphology and control of 2D virtual creatures. *ALIFE 2020: the 2020 conference on artificial life*. Cambridge, MIT Press Publ., 2020, pp. 592–601.
 19. Yaeger L. S., Sporns O. Evolution of neural structure and complexity in a computational ecology. In *artificial life X: proceedings of the tenth international conference on the simulation and synthesis of living systems*. 2006, pp. 330–336.
 20. Yaeger L. S. How evolution guides complexity. *HFSP journal*. 2009, vol. 3, no. 5, pp. 328–339. DOI: 10.2976/1.3233712.
 21. Yaeger L. S., Griffith V., Sporns O. *Passive and driven trends in the evolution of complexity*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1112.4906> (accessed: 29.08.2023).
 22. Taylor T. *Requirements for open-ended evolution in natural and artificial systems*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1507.07403> (accessed: 29.08.2023).
 23. Soros L. B., Stanley K. O. Identifying necessary conditions for open-ended evolution through the artificial life world of Chromaria. In *artificial life 14: proceedings of the fourteenth international conference on the synthesis and simulation of living systems*. 2014, pp. 793–800. DOI: 10.7551/978-0-262-32621-6-ch128.
 24. Wang R., Lehman J., Clune J., Stanley K. O. *Paired open-ended trailblazer (POET): endlessly generating increasingly complex and diverse learning environments and their solutions*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1901.01753> (accessed: 29.08.2023)
 25. Brant J. C., Stanley K. O. Minimal criterion coevolution: a new approach to open-ended search. In *GECCO '17: proceedings of the genetic and evolutionary computation conference*. 2017, pp. 67–74. DOI: 10.1145/3071178.3071186.
 26. Sims K. Evolving virtual creatures. In *proceedings of the 21st annual conference on computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH' 94)*. New York, 1994, pp. 15–22. DOI: 10.1145/192161.192167.
 27. Putra R. V. W., Shafique M. *TopSpark: a timestep optimization methodology for energy-efficient spiking neural networks on autonomous mobile agents*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2303.01826> (accessed: 29.08.2023).
 28. Baker B., Kanitscheider I., Markov T., Wu Y., Powell G., McGrew B., Mordatch I. *Emergent tool use from multi-agent autocurricula*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1909.07528> (accessed: 29.08.2023).
 29. Doyle C., Shader S., Lau M., Sano M., Yamins D. L. K., Haber N. *Developmental curiosity and social interaction in virtual agents*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.13396> (accessed: 29.08.2023).
 30. OpenAI, Akkaya I., Andrychowicz M., Chociej M., Litwin M., McGrew B., Petron A., Paino A., Plappert M., Powell G., Ribas R., Schneider J., Tezak N., Tworek J., Welinder P., Weng L., Yuan Q., Zaremba W., Zhang L. *Solving Rubik's cube with a robot hand*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1910.07113> (accessed: 29.08.2023).
 31. Yu C., Yu H., Gao S. Learning control admissibility models with graph neural networks for multi-agent navigation. In *proceedings of the 6th conference on robot learning, in proceedings of machine learning research*. 2023, pp. 934–945.
 32. Wijmans E., Savva M., Essa I., Lee S., Morcos A. S. Batra D. *Emergence of maps in the memories of blind navigation agents*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2301.13261> (accessed: 29.08.2023).
 33. Salimans T., Ho J., Chen X., Sidor S., Sutskever I. *Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning*. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1703.03864> (Available at: 29.08.2023).
 34. Stanley K. O., Miikkulainen R. Evolving neural networks through augmenting topologies. *Evolutionary computation*. 2002, vol. 10, no. 2. pp. 99–127. DOI: 10.1162/106365602320169811.
 35. Papavasileiou E., Cornelis J., Jansen B. A systematic literature review of the successors of "NeuroEvolution of augmenting topologies." *Evolutionary computation*. 2021, vol. 29, no. 1, pp. 1–73. DOI: 10.1162/evco_a_00282
 36. Stanley K., Cornelius R., Miikkulainen R., D'Silva T., Gold A. Real-time learning in the NERO video game. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence and interactive digital entertainment*. 2021, vol. 1, no. 1, pp. 159–160. DOI: 10.1609/aiide.v1i1.18736.

37. Stanley K. O., D'Ambrosio D. B., Gauci, J. A. Hypercube-based encoding for evolving large-scale neural networks. *Artificial life*. 2009, vol. 15, no. 2, pp. 185–212. DOI: <https://doi.org/10.1162/artl.2009.15.2.15202>.
38. Risi S., Stanley K. O. An enhanced hypercube-based encoding for evolving the placement, density, and connectivity of neurons. *Artificial life*. 2012, vol. 18, no. 4, pp. 331–363. DOI: 10.1162/ARTL_a_00071.
39. Hewland J., Nitschke G. The benefits of adaptive behavior and morphology for cooperation. In *2015 IEEE symposium series on computational intelligence (SSCI)*. 2015, pp. 1047–1054. DOI: 10.1109/SSCI.2015.151.
40. Yushchenko A. G., Zachepylo M. O. *Modelling of evolutionary conditioned noogenesis of virtual biocenoses*. 2020. 10 p. [Preprint]. DOI: 10.13140/RG.2.2.30785.38246.

Received 15.09.2023

УДК 004.8

М. О. ЗАЧЕПИЛО, аспірант кафедри Системи Інформації, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Mykhailo.Zachepyllo@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6410-5934>

О. Г. ЮЩЕНКО, кандидат фізико-математичних наук (Ph. D), професор кафедри Системи Інформації, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут, м. Харків, Україна; e-mail: A.G.Yushchenko@ntu.kharkiv.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0078-3450>

НАУКОВІ ОСНОВИ, ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНО ОБУМОВЛЕНОГО НООГЕНЕЗУ ШТУЧНИХ СТВОРІНЬ У ВІРТУАЛЬНИХ БІОЦЕНОЗАХ

Це дослідження мало на меті отримати глибоке розуміння складних цифрових екосистем віртуальних біоценозів з метою з'ясувати та відтворити появу та еволюцію інтелекту в штучних створіннях, що називається ноогенезом. Було проведено комплексний аналіз існуючих досліджень у віртуальних біоценозах, щоб отримати цінну інформацію про складність моделювання динамічних екосистем, де штучні створіння беруть участь у комплексній взаємодії. Було підкреслено ключову роль нейронних мереж у формуванні адаптивної поведінки штучних створіннь у цих середовищах. Ретельне дослідження методології еволюції нейронних мереж виявило еволюцію складності їхньої архітектури з часом, кульмінацією якої стало сприяння гнучкій та інтелектуальній поведінці. Однак існував брак досліджень у сфері розвитку еволюційних можливостей спілкування та співпраці у віртуальних біоценозах. У відповідь на цю прогалину була введена модель та обґрунтована шляхом імітаційних експериментів. Результати моделювання яскраво проілюстрували дивовижну здатність моделі породжувати адаптивних істот, наділених здатністю ефективно реагувати на динамічні зміни навколишнього середовища. Ці адаптивні штучні істоти показали ефективну оптимізацію споживання енергії та отримання ресурсів. Крім того, вони продемонстрували як інтелектуальні, так і фізичні трансформації, пов'язані з принципами еволюції та кодування, натхненними нейроеволюцією доповнених топологій. Важливо, що стало очевидним, що еволюційні процеси, властиві моделі, були нерозривно пов'язані з самим середовищем, таким чином бездоганно узгоджуючись із головною метою цього дослідження. Були окреслені майбутні напрями досліджень у цій галузі. Ці напрями забезпечили основу для подальшого дослідження еволюції штучних створіннь у віртуальних біоценозах і появи передових можливостей спілкування та співпраці. Ці досягнення містять потенціал для підняття штучного життя та штучного інтелекту на новий рівень розуміння та можливостей.

Ключові слова: агентне моделювання, штучне життя, штучний інтелект, зростаючі нейронні мережі, еволюція, ноогенез, еволюційний дизайн.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Зачепило Михайло Олександрович, Zachepylo Mykhailo Oleksandrovych

Автор 2 / Author 2: Ющенко Олександр Георгійович, Yushchenko Oleksandr Heorhiiiovych

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

В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна, ; volodymyr.leshchynskiy@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>

МЕТОД МОЖЛИВИСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОЯСНЕННЯ В СИСТЕМІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Предметом дослідження є процеси формування пояснень щодо рішення системи штучного інтелекту. Пояснення використовуються для того, щоб користувач зрозумів процес отримання результату і міг більш ефективно застосовувати інтелектуальну інформаційну систему для формування практично прийнятних для нього рішень. Мета роботи полягає у розробці методу оцінки пояснень з урахуванням відмінностей у вхідних даних та відповідному рішенні системи штучного інтелекту. Вирішення цієї задачі дає можливість оцінити відповідність пояснення щодо внутрішньому механізму прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі незалежно від рівня знань користувача щодо особливостей формування та використання такого рішення. Для досягнення мети вирішуються такі задачі: структуризація оцінки пояснень в залежності від рівня їх деталізації з урахуванням їх відповідності процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі та рівню сприйняття користувача такої системи; розробка методу оцінки пояснень на основі їх відповідності процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Висновки. Виконано структуризацію оцінки пояснень в залежності від рівня їх деталізації. Виділено рівні асоціативних залежностей, прецедентів, каузальних залежностей та інтерактивний, що визначають різний ступінь деталізації пояснень. Показано, що асоціативний та каузальний рівні деталізації пояснень можуть бути оцінені з використанням числових, ймовірнісних або можливісних показників. Прецедентний та інтерактивний рівні потребують суб'єктивної оцінки на основі опитування користувачів системи штучного інтелекту. Розроблено метод можливісного оцінювання відповідності пояснень процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі з урахуванням залежностей між вхідними даними та рішенням інтелектуальної системи. Метод містить етапи оцінювання чутливості, коректності та складності пояснення на основі порівняння значень та кількості використаних у поясненні вхідних даних. Метод дає можливість комплексно оцінити пояснення з позицій стійкості до несуттєвих змін у вхідних даних, відповідності пояснення отриманому результату, а також складності обчислення пояснення. У аспекті практичного застосування метод дає можливість мінімізувати кількість вхідних змінних для пояснення при задоволенні обмеження на чутливість пояснення, що створює умови для більш ефективного формування тлумачення на основі використання підмножини ключових вхідних змінних, які мають суттєвий вплив на отримане в інтелектуальній системі рішення.

Ключові слова: пояснення, оцінка пояснення, система штучного інтелекту, інтелектуальна система, зрозумілий штучний інтелект, асоціативна залежність, каузальна залежність, прецедент, інформаційна система, рекомендаційна система.

Вступ. Ефективне застосування сучасних систем штучного інтелекту базується на використанні методів машинного навчання, які орієнтовані на побудову алгоритмів прийняття рішень з використанням виявлених у наборах даних патернів та закономірностей [1].

Навчені моделі часто є непрозорими і, відповідно, незрозумілими для користувачів інтелектуальних систем. Це знижує ступінь довіри до запропонованих рішень. В результаті користувача може відмовитись від використання рішень системи штучного інтелекту і в цілому знижується ефективність її застосування [2].

Для вирішення даної проблеми використовуються пояснення, що представляють користувачеві причини прийнятих рішень, а також причини окремих дій із процесу прийняття цих рішень. Такий підхід створює умови для успішного застосування рішень інтелектуальної системи при вирішенні практичних задач користувача [3].

При побудові «прозорої» системи штучного інтелекту використовуються підходи на основі білого та чорного ящиків [4]. В першому випадку використовуються моделі, які можуть бути інтерпретовані користувачем, наприклад дерева рішень [5]. Тому проблема інтерпретації в рамках першого підходу зазвичай є наслідком організаційних обмежень.

У другому випадку паралельно з моделлю прийняття рішення в системі штучного інтелекту формується спрощена модель процесу отримання рішення,

яка використовується для пояснення. Ця модель не в повній мірі відповідає базовій моделі інтелектуальної системи [6]. Невідповідність між моделями може привести до некоректних пояснень, що свідчить про актуальність проблематики оцінки пояснення щодо його відповідності процесу прийняття рішення та відповідності потребам практичного застосування отриманого в інтелектуальній системі результату [7–9].

На сьогодні в межах вказаної задачі послідовно вирішуються дві підзадачі.

Перша орієнтована на перевірку відповідності пояснення отриманому результату при відомих вхідних даних. Оцінювання виконується з використанням властивостей вхідних даних та результату.

Друга пов'язана із оцінкою того, як пояснення сприймається користувачем системи штучного інтелекту. Оцінювання виконується на основі опитувань та інтерактивної взаємодії із користувачами системи.

В даній роботі розглядається перша підзадача. Її вирішення є необхідною умовою для ефективного розв'язання другої задачі, оскільки невідповідність між поясненням та процесом прийняття рішення суттєво знижує ефективність осмислення такого процесу користувачем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні напрямки досліджень щодо побудови пояснень в інтелектуальних системах виділено в рамках програми зрозумілого штучного інтелекту (XAI),

© Чалий С. Ф., Лещинський В. О., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



реалізованої в останні роки DARPA (Агентство оборонних досліджень проєктів з розширених можливостей) [3, 8]. Мета зрозумілого штучного інтелекту полягає в створенні таких інтелектуальних систем, які можуть пояснювати свої висновки користувачем у такій формі, щоб останні могли зрозуміти як логіку їх функціонування, так і послідовність робіт процесу отримання рішення.

Існуючі методи оцінки пояснень спрямовані переважно визначення впливу вхідних даних на процес прийняття рішень [2, 3, 8, 10, 11]. Такі підходи є корисними, коли інтелектуальна система визначається як «чорний ящик». Також розглядається сприйняття пояснень самими користувачами [2]. Однак, довіра користувачів до результатів та процесу прийняття рішень в цілому визначається коректністю, правильністю цих висновків. Оцінка коректності рішень інтелектуальної системи розглядається в роботі [10]. В цілому в існуючих роботах основна увага приділяється оцінюванню окремих аспектів пояснення [2, 10, 11], виділяються відповідні показники. Однак комплексній оцінці пояснення з урахуванням відповідності пояснення процесу прийняття рішень, а також складності реалізації пояснення не приділялось достатньо уваги.

Визначення такої комплексної оцінки у загальному випадку суттєво залежить від предметної області. Уніфікація оцінки пояснень з урахуванням вказаних відмінностей може бути виконана на базі теорії можливостей, оскільки остання дозволяє ймовірно описати використання вхідних даних різних типів, зв'язок даних з результатом, а також можливості зменшення складності пояснення [12].

Таким чином, важливою є задача формування комплексної оцінки пояснення, оскільки вона дає можливість спростити пояснення, забезпечуючи разом з тим формування коректного тлумачення, що відповідає процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі з урахуванням поточних значень вхідних даних.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці методу оцінки пояснень з урахуванням відмінностей у вхідних даних та відповідному рішенні системи штучного інтелекту. Вирішення цієї задачі дає можливість оцінити відповідність між поясненням внутрішньому механізму прийняття рішення в інтелектуальній системі незалежно від рівня знань користувача щодо особливостей формування та використання такого рішення.

Для досягнення мети роботи вирішуються такі задачі:

- структуризація оцінки пояснень в залежності від рівня їх деталізації з урахуванням їх відповідності процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі та рівню сприйняття користувача такої системи;
- розробка методу оцінки пояснень на основі їх відповідності процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі.

Структуризація рівнів деталізації та оцінки пояснень

Типовий процес пояснення в системі штучного інтелекту має такі кроки:

- реалізація процесу побудови пояснень;

- надання згенерованого пояснення користувачеві інтелектуальної системи;
- осмислення пояснення користувачем;
- підвищення ефективності роботи користувача з інтелектуальною системою.

Необхідною умовою реалізації останнього етапу є оцінка пояснення. Така оцінка може бути надана як на етапі його побудови, так і на етапі осмислення пояснення користувачем (рис. 1).



Рис. 1. Оцінка пояснення на першому та третьому етапах формування тлумачення

У першому випадку оцінка дає можливість установити відповідність пояснення вхідним даним та рішенню, отриманого системою штучного інтелекту. У другому випадку оцінка відображає відповідність пояснення поточним знанням користувача щодо предметної області, тобто встановлює прийнятність пояснення для користувача. В обох випадках пояснення може бути представлено з різним рівнем деталізації. Тому для досягнення поставленої мети необхідно структурувати пояснення за рівнем його деталізації та з урахуванням можливостей його суб'єктивної та об'єктивної оцінки.

Структуризація за рівнями деталізації дає можливість врахувати сприйняття пояснення користувачем з урахуванням різного рівня знань останнього щодо предметної області.

Структуризація за суб'єктивними та об'єктивними характеристиками дає можливість окремо оцінити пояснення за його відповідністю вхідними і вихідним даним системи штучного інтелекту, а також за його відповідністю знанням та потребам користувача.

Перша оцінка може бути представлена в числовому вигляді. Друга оцінка потребує розробки ментальної моделі користувача. У поточному дослідженні ключова увага зосереджена на оцінці об'єктивних характеристик пояснення.

Зв'язок між першим та другим аспектами представлено на рис. 1.

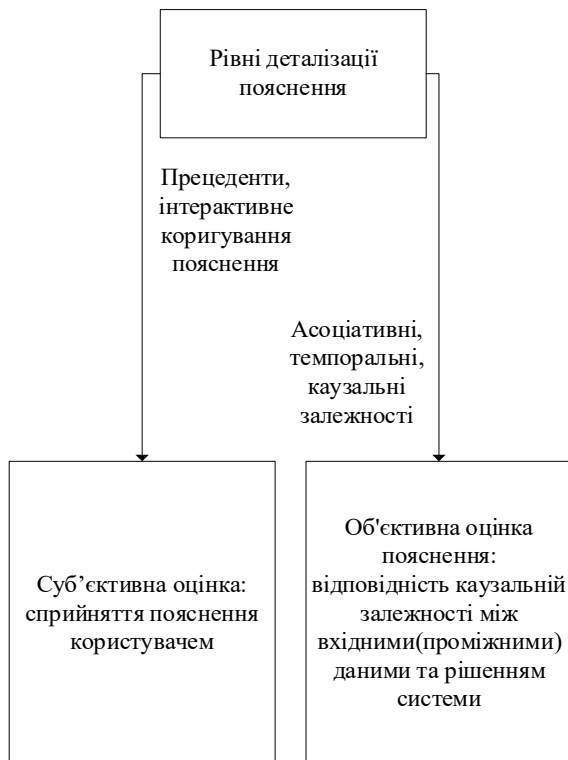


Рис. 2. Оцінка пояснення в залежності від рівня деталізації

Запропонована ієрархія рівнів деталізації пояснення представлена у табл. 1.

Ключова ідея виділення рівнів полягає в тому, щоб відокремити «поверхневі» та «глибинні» знання щодо предметної області.

Перші відображають інтерфейс, зовнішнє представлення роботи інтелектуальної системи.

Другі задають причини наслідкові зв'язки, які обумовлюють процес роботи системи.

Пояснення на першому та другому рівнях деталізації відображають знання з практики застосування рішення інтелектуальної системи. Вони не потребують знання принципів роботи інтелектуальної системи.

Пояснення на 3 та 4 рівнях містять зв'язки, що базуються на фізичних, інформаційних та інших залежностях, які обумовлюють прийняте в систем штучного інтелекту рішення.

Таблиця 1 – Рівні деталізації пояснення

Рівень	Особливості
1. Асоціативні залежності	1) Пояснення відповідає на запитання «На що схожі причини прийнятого рішення?» 2) Відповідь на вказане запитання представляється у формі діаграм графіків, рамок для фрагментів зображень, тексту, уточнення семантики так, щоб встановити асоціативний зв'язок між властивостями вхідних даних та рішенням інтелектуальної системи.
2. Прецеденти	1) Пояснення відповідає на запитання «Як на прикладі показати причини отриманого рішення?» 2) Відповідь на дане запитання представляється спрощеним зрозумілим прикладом, який однозначно вказує, чому було отримано рішення для поточної категорії вхідних даних. 3) Пояснення доповнюється значенням критерія відповідності рішення інтелектуальної системи. 4) Низьке значення оцінки відповідності отриманого рішення (наприклад, менше 0.5) свідчить про його непридатність до практичного застосування. У такому випадку пояснення має бути доповнене властивостями вхідних даних, які привели до низької оцінки.
3. Каузальний	1) Пояснення відповідає на запитання «Якими є безпосередні причини отриманого рішення?» 2) Відповідь на дане запитання представляється у вигляді правил продукції, правил логіки, або у текстовій формі. Різні форми представлення правил мають спільну особливість: містять вхідні або проміжні змінні та їх значення, що мають визначальний вплив на отримане рішення. 3) Недетерміноване каузальне пояснення доповнюється показником оцінки відповідності причинно-наслідкової залежності. Даний показник може мати ймовірнісний або можливісний характер. 4) Низьке значення оцінки відповідності отриманого рішення (наприклад, менше 0.5) свідчить про його непридатність до практичного застосування.
4. Інтерактивний	1) На даному рівні пояснення уточнюється з використанням знань користувача щодо предметної області. Пояснення відповідає на запитання «Як доповнити пояснення щоб воно стало зрозумілим користувачеві?» 2) Уточнення відбувається із урахуванням додаткових вхідних даних, а також знань користувача.

Ключові відмінності першого та другого рівнів деталізації полягають в такому. Асоціативні залежності відповідають загальним знанням користувача щодо предметної області. Такі залежності можуть

виступати в якості прообразів детермінованих правил виводу рішення. Тому даний рівень може бути оцінений з використанням об'єктивних числових оцінок.

Наприклад, якщо виділені в поясненні ключові елементи зображення містять кінцівки людини у русі, то користувач має зрозуміти, чому система віднесла зображення до класу людей, що біжать.

Рівень прецедентів містить множину асоціативних залежностей, оскільки прецедент представляє собою вхідні та дані типове реалізоване рішення, що є зрозумілим для користувача.

Наприклад, зображення людини, що біжить та результуючий клас цього зображення.

На другому рівні деталізації виконується порівняння прецеденту із знаннями користувача. Тому даний рівень потребує суб'єктивної оцінки на основі опитування користувачів.

Рівень 3 задає детерміновані або оцінювані залежності, що визначають причини рішення або окремих дій процесу формування рішення в системі штучного інтелекту.

Детерміновані залежності для пояснення можуть бути отримані лише у випадку прозорості для користувача моделі прийняття рішень в системі штучного інтелекту. Тобто в даному випадку модель має можливість інтерпретації.

У інших випадках, при представленні моделі прийняття рішень у вигляді «чорного» або «сірого» ящика, каузальні залежності матимуть ймовірний характер. Тому такі залежності мають бути доповнені ймовірнісною або можливісною оцінками. Таким чином, третій рівень деталізації потребує об'єктивної оцінки пояснення.

Четвертий рівень деталізації забезпечує вибір та уточнення пояснення любого з попередніх рівнів. Відповідно, пояснення може бути доповнено асоціативними або каузальними залежностями, що враховують додаткові вхідні змінні. Або ж можуть бути відкинуті відомі з точки зору користувача та тривіальні залежності.

Аналогічно, при використанні прецедентного рівня деталізації пояснення може бути скоригований перелік базових прецедентів. Задача уточнення прецедентів виникає, наприклад при зміні соціальних, юридичних правил, вподобань користувача інтелектуальної системи, тощо.

Наприклад, при зміні демографічних характеристик користувача (освіти, місце проживання, тощо) можуть змінитися і його вподобання щодо товарів та послуг в системі електронної комерції. Відповідна рекомендаційна підсистема потребує налагодження, що може бути вирішено на основі уточнення пояснення щодо рекомендованого переліку товарів та послуг.

Метод можливісного оцінювання пояснень

Метод оцінювання пояснень призначений для перевірки відповідності пояснень парам (набір вхідних даних, рішення інтелектуальної системи) або (набір проміжних даних, проміжний стан інтелектуальної системи). Метод орієнтований на перевірку тлумачень на етапі побудови пояснення (рис. 1).

Метод використовує такі показники оцінки пояснень: чутливість пояснень до властивостей вхідних даних; коректність пояснень; складність формування пояснень.

Перший показник відображає оцінку відмінностей у рішеннях системи при незначних змінах у вхідних даних. Оцінка чутливості виконується шляхом установлення відмінностей між елементами рішення та вхідними даними за умови, що пояснення є схожими або однаковими. Тобто якщо пари (вхідні дані, рішення) відрізняються несуттєво, то і пояснення має бути схожим або ідентичним. У випадку суттєвих відмінностей в даних пояснення також має відрізнитись [12]. Фактично даний показник впливає на точність пояснення: при невисокій чутливості будуть сформовані однакові пояснення для різних пар (вхідні дані, результат), що знижує точність тлумачення. При високій чутливості пояснення має відрізнитись для несуттєвих змін у вхідних даних, що ускладнює сприйняття пояснення користувачем. Таким чином, оцінка чутливості пояснення є підґрунтям для визначення ефективності використання тлумачення користувачем.

Показник коректності є бінарною оцінкою, яка відповідає на питання: «Чи пояснення відображає процес прийняття рішення в інтелектуальній системі?», «Чи пояснення відображає асоціативну або каузальну залежність між вхідними даними та рішенням інтелектуальної системи?». Перше питання є актуальним при представленні системи у вигляді «чорного» або «сірого» ящика, а друге – якщо система представляється як «чорний» ящик. Даний показник визначає можливість використання пояснення при застосуванні системи [10].

Показник складності відображає кількість вхідних даних, які необхідні для побудови пояснення. Побудова пояснень пов'язана із створенням моделі процесу тлумачення, яка є менш складною порівняно із моделлю прийняття рішення. Тому, на відміну від двох попередніх, цей показник визначає можливість реалізації пояснень в інтелектуальній системі.

Зв'язок між показниками відображено на рис. 3.



Рис. 3. Зв'язок між показниками оцінки пояснення

Метод оцінювання пояснення містить такі ключові етапи.

Етап 1. Перевірка коректності пояснення.

Результати даного етапу дають можливість установити відповідність пояснення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі.

Етап 2. Оцінка складності пояснення.

Результати даного етапу дають можливість з'ясувати, чи пояснення може бути реалізовано та використано.

Етап 3. Оцінка чутливості пояснення.

Результати даного етапу дають можливість визначити вплив відхилень у значеннях вхідних даних на пояснення.

Етап 4. Зменшення складності при обмеженні по чутливості пояснення.

Реалізація даного етапу дає можливість зменшити вплив неключових вхідних даних на пояснення.

На першому етапі методу розраховується коректність пояснення. В рамках можливісного підходу коректність визначається через необхідність вибору отриманого рішення на заданому наборі вхідних даних. Можливість $\Pi(R_i)$ рішення R_i визначається через найбільшу ймовірність використання R_i в минулому на множині схожих рішень $R^* = \{R_j : (\forall j) R_i \neq R_j\}$. Наприклад, можливість рішення щодо вибору комп'ютера з певним процесором в системі електронної комерції визначається через найбільшу ймовірність вибору комп'ютера з процесором цієї ж фірми такого ж покоління.

Необхідність рішення $N(R_i)$ задається через можливість вибору всіх інших рішень, тобто $1 - \Pi(R \setminus R_i)$. В наведеному прикладі необхідність задається через можливість вибору процесорів всіх інших фірм, незалежно від їх покоління. Тобто можливість визначається для цільової підмножини вхідних даних, а необхідність – для повної множини за виключенням цільової підмножини.

Формально, пояснення $Expl(R_i)$ рішення R_i для вхідних даних X_i є коректним, якщо значення необхідності перевищує 0.5 [10]:

$$C(Expl(R_i)) = \text{true} | 1 - \Pi(R \setminus R_i) > 0.5. \quad (1)$$

Семантика виразу (1) полягає в тому, що для коректного пояснення $Expl(R_i)$ щодо цільового рішення R_i можливість вибору альтернативних рішень $R_j \neq R_i$ на підмножині $X \setminus X_i$ має становити менше, ніж 0.5. Можливість використання даного представлення коректності пояснення базується на тому, що вхідні змінні $X_{i,k}$ мають безпосередній зв'язок з результатом. Наприклад, в якості вхідних даних використовується модель процесора, а вихідних – комп'ютер з процесором даної моделі.

На етапі 2 оцінюється складність імплементації та використання пояснення. Складність пояснення

$Expl(R_i)$ оцінюється як кількість вхідних змінних $|X_i|$ для даного пояснення.

На етапі 3 виконується оцінка чутливості пояснення. Чутливість задається через відхилення співвідношень вхідних даних та рішення за умови схожості пояснень [12]. У можливісному аспекті чутливість S визначається через відмінність можливостей використання різних вхідних даних для отримання одного й того ж пояснення для однакового результату:

$$S(Expl) = \max \left(\left| \Pi(X_i) - \Pi(X_j) \right| \right) \quad (2)$$

$$|Expl_i = Expl_j, R_i = R_j.$$

Обмеження $R_i = R_j$ ускладнює оцінку чутливості пояснення, оскільки для схожих результатів може бути надано одне й те ж пояснення. Наприклад, в системі електронної комерції ми можемо рекомендувати різні моделі ноутбуків з одним і тим же поясненням: модель пропонується на основі властивостей процесора.

Тому у випадку однакового пояснення для схожих результатів потрібно враховувати відповідність між можливостями вхідних даних та рішення системи:

$$S(Expl) = \max \left(\left| \frac{\Pi(X_i)}{\Pi(R_i)} - \frac{\Pi(X_j)}{\Pi(R_j)} \right| \right) | Expl_i = Expl_j. \quad (3)$$

В основі можливісної оцінки (3) лежить ідея про те, що чутливість відображає максимальне відхилення між можливостями впливу вхідних даних на рішення системи штучного інтелекту.

На етапі 4 мінімізується кількість вхідних даних, що використовується для побудови пояснення. В основі такої оцінки лежить ідея про те, що необхідно виділити лише суттєві для використання пояснення вхідні дані. Суттєвими є дані, які впливають на чутливість пояснення. Ці дані потрібно враховувати, оскільки їх вилучення може привести до зниження точності пояснення, тобто до невідповідності пояснення реальному процесу прийняття рішення. Відповідно, якщо частина даних не впливає на чутливість пояснення, то вони можуть бути виключені з останнього.

Постановка задачі мінімізації складності має вигляд:

Дано :

$$C(Expl(R_i)) = \text{true}.$$

Необхідно :

$$|X_i| \rightarrow \min. \quad (4)$$

За умови :

$$(\forall i) S(Expl(R_i)) = S(Expl).$$

На даному етапі циклічно на кожному n -кроці виконується вилучення складових $X_{i,k}$ із поточної множини даних $X_i^{(n)}$ для пояснення за умови, що

$S(Expl(R_i)) = S(Expl)$, тобто чутливість пояснення не зменшується:

$$|X_i^{(n+1)}| = |X_i^{(n)} \setminus X_{i,k}| \mid S(Expl(R_i)) = S(Expl). \quad (5)$$

Використання методу дає можливість зменшити кількість вхідних даних для пояснення, представленого асоціативною або каузальною залежністю згідно деталізації пояснень у табл. 1.

Розглянемо приклад формування вхідних даних для запропонованого методу на основі аналізу журналу продажів у системі електронної комерції. Вхідними даними є пояснення у формі залежності

ключові комплектуючі комп'ютера →
пояснення щодо вибору комп'ютера .

Ці дані необхідно доповнити значеннями $\Pi(X_i)$, $\Pi(R_i)$, $|X_i|$. У журналі продажів міститься інформація щодо проданих комп'ютерів різних типів. Інформація про продажі дає можливість побудувати множини ймовірностей вибору цих комп'ютерів. На основі обраних ймовірностей формується можливість результату $\Pi(R_i)$, тобто можливість покупки з проданих комп'ютерів, наприклад із процесорами з однієї серії. Для кожного з комп'ютерів відомі ключові комплектуючі, характеристики яких впливають на вибір користувача. Це дає можливість розрахувати ймовірності їх використання в куплених продуктах і відповідні можливості $\Pi(X_i)$. Наприклад, розраховується можливість використання процесорів певної серії з урахуванням ймовірності їх використання в комп'ютерах різних торгових марок. Значення $|X_i|$ розраховується для відповідних підмножин комплектуючих, наприклад, для серії процесорів, один із яких є у рекомендованому комп'ютері.

Експериментальна перевірка методу була виконана на основі журналу продажів святкових товарів мережі супермаркетів. Пояснення мало вигляд: призначення групи товарів, час покупки, ключові слова як асоціативні причини вибору. За результатами експериментальної перевірки встановлено, що пояснення на основі групи товарів має показник коректності $C = 0.63$ лише на окремих інтервалах часу, зазвичай в межах тижнів від дати свят. Тобто мінімальний набір елементів, який забезпечував незмінну чутливість пояснення становить 2. Значення чутливості становило $S = 0.44$.

Висновки. Виконано структурування оцінки пояснень в залежності від рівня їх деталізації. Виділено рівні асоціативних залежностей, прецедентів, каузальних залежностей та інтерактивний, що визначають різний ступінь деталізації пояснень. Показано, що асоціативний та каузальний рівні деталізації пояснень можуть бути оцінені з використанням числових, ймовірнісних або можливісних показників. Прецедентний та інтерактивний рівні потребують суб'єктивної оцінки

на основі опитування користувачів системи штучного інтелекту.

Запропоновано метод можливісного оцінювання відповідності пояснень процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі з урахуванням залежностей між вхідними даними та рішенням інтелектуальної системи. Метод містить етапи оцінювання чутливості, коректності та складності пояснення на основі порівняння значень та кількості використаних у поясненні вхідних даних. Метод дає можливість комплексно оцінити пояснення як у аспектах стійкості до несуттєвих змін у вхідних даних, відповідності пояснення отриманому результату, а також складності обчислення пояснення.

У аспекті практичного застосування метод дає можливість підвищити ефективність формування пояснення шляхом відбору підмножини ключових вхідних змінних, які мають суттєвий вплив на отримане в інтелектуальній системі рішення.

Список використаної літератури

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Alonso J. M., Castiello C., Mencar C. A Bibliometric Analysis of the Explainable Artificial Intelligence Research Field. In: Medina, J., et al. *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Foundations. IPMU. Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol 853. P. 3–15.
- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. Vol. 40 (2). P. 44–58.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUT07). 2007. P. 801–810.
- Gilpin L. H., Bau D., Yuan B. Z., Bajwa A., Specter M., Kagal L. Explaining Explanations: An Overview of Interpretability of Machine Learning. *arXiv:1806.00069*. 2018.
- Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 267. P. 1–38.
- Camburu O. M., Giunchiglia E., Foerster J., Lukaszewicz T., Blunsom P. Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. 2019. *arXiv:1910.02065*.
- Gunning D., Vorm E., Wang J., "Darpa's Explainableai (XAI) Program: a Retrospective", *Applied AI Letters*. 2021. Vol. 2, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1002/aill.2.61>.
- Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022. № 6 (3). P. 60–65.
- Chalyi S., Leshchynskiy V. Possible evaluation of the correctness of explanations to the end user in an artificial intelligence system. *A.I.S.* 2023. № 7. P. 75–79.
- Chalyi S., Leshchynskiy V. Probabilistic counterfactual causal model for a single input variable in explainability task. *Advanced Information Systems*. 2022. №7(3), P. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.08>.
- Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Оцінка чутливості пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. № 2. С. 165–169.

References (transliterated)

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Alonso J.M., Castiello C., Mencar C. A Bibliometric Analysis of the Explainable Artificial Intelligence Research Field. In: Medina, J., et al. *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Foundations. IPMU. Communications in Computer and Information Science*. 2018, vol. 853, pp. 3–15.

3. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019, vol. 40 (2), pp. 44–58.
4. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUI07). 2007, pp. 801–810.
5. Gilpin L. H., Bau D., Yuan B. Z., Bajwa A., Specter M., Kagal L. Explaining Explanations: An Overview of Interpretability of Machine Learning. *arXiv:1806.00069*. 2018.
6. Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*. 2019, vol. 267, pp. 1–38.
7. Camburu O.M., Giunchiglia E., Foerster J., Lukasiewicz T., Blunsom P. Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. 2019. *arXiv:1910.02065*.
8. Gunning D., Vorm E., Wang J., Turek M. Darpa's Explainableai (XAI). Program: a Retrospective. *Applied AI Letters*. 2021, vol. 2, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1002/ail2.61>.
9. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 6 (3), pp. 60–65.
10. Chalyi S., Leshchynskyi V. Possible evaluation of the correctness of explanations to the end user in an artificial intelligence system. *A.I.S.* 2023, no. 7, pp.75–79.
11. Chalyi S, Leshchynskyi V. Probabilistic counterfactual causal model for a single input variable in explainability task. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 7 (3), pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.08>.
12. Chalyi S. Leshchynskyi V. Otsinka chutlyvosti poiasnen v intelektualnii informatsiini systemi [Evaluation of the sensitivity of explanations in the intelligent information system]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats* [Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers]. 2023, no. 2, pp. 165–169.

Надійшло (received) 05.10.2023

UDC 004.8:004.9

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

V. O. LESHCHYNSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>

A METHOD FOR EVALUATING EXPLANATIONS IN AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM USING POSSIBILITY THEORY

The subject of the research is the process of generating explanations for the decision of an artificial intelligence system. Explanations are used to help the user understand the process of reaching the result and to be able to use an intelligent information system more effectively to make practical decisions for him or her. The purpose of this paper is to develop a method for evaluating explanations taking into account differences in input data and the corresponding decision of an artificial intelligence system. The solution of this problem makes it possible to evaluate the relevance of the explanation for the internal decision-making mechanism in an intelligent information system, regardless of the user's level of knowledge about the peculiarities of making and using such a decision. To achieve this goal, the following tasks are solved: structuring the evaluation of explanations depending on their level of detail, taking into account their compliance with the decision-making process in an intelligent system and the level of perception of the user of such a system; developing a method for evaluating explanations based on their compliance with the decision-making process in an intelligent system. Conclusions. The article structures the evaluation of explanations according to their level of detail. The levels of associative dependencies, precedents, causal dependencies and interactive dependencies are identified, which determine different levels of detail of explanations. It is shown that the associative and causal levels of detail of explanations can be assessed using numerical, probabilistic, or possibilistic indicators. The precedent and interactive levels require a subjective assessment based on a survey of users of the artificial intelligence system. The article develops a method for the possible assessment of the relevance of explanations for the decision-making process in an intelligent system, taking into account the dependencies between the input data and the decision of the intelligent system. The method includes the stages of assessing the sensitivity, correctness and complexity of the explanation based on a comparison of the values and quantity of the input data used in the explanation. The method makes it possible to comprehensively evaluate the explanation in terms of resistance to insignificant changes in the input data, relevance of the explanation to the result obtained, and complexity of the explanation calculation. In terms of practical application, the method makes it possible to minimize the number of input variables for the explanation while satisfying the sensitivity constraint of the explanation, which creates conditions for more efficient formation of the interpretation based on the use of a subset of key input variables that have a significant impact on the decision obtained by the intelligent system.

Keywords: explanation, evaluation of explanation, artificial intelligence system, intelligent system, comprehensible artificial intelligence, associative dependence, causal dependence, precedent, information system, recommendation system.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чалий Сергій Федорович, Chalyi Serhii Fedorovich

Автор 2 / Author 2: Лещинський Володимир Олександрович, Leshchynskyi Volodymyr Oleksandrovich

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

APPLIED MATHEMATICS

DOI: 10.20998/2079-0023.2023.02.15
УДК 513.88

А. А. БОЄВА, кандидат фізико-математичних наук (PhD), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, м. Харків, Україна; e-mail: annaboeva19@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3355-8460H>

ПРО ОДИН КЛАС НЕСТАЦІОНАРНИХ КРИВИХ В ГІЛЬБЕРТОВОМУ ПРОСТОРІ

Стационарні випадкові процеси достатньо добре вивчалися протягом останніх років, починаючи з робіт А. Н. Колмогорова. Можливість побудування кореляційної теорії нестационарних випадкових процесів розглядалася в монографіях М. С. Ліфшица, А. А. Янцевича, В. А. Золотарьова. Деякі класи нестационарних кривих досліджувалися В. Е. Кацнельсоном та ін. В даній роботі розглядалися нестационарні випадкові процеси як криві, які «слабо відхиляються» від випадкових процесів з кореляційною функцією спеціального вигляду. Вводиться інфінітезимальна кореляційна функція, яка за змістом є відхилення від випадкового процесу з даною кореляційною функцією. В роботі розглядаються нестационарні випадкові процеси у випадку, коли оператор процесу має одновимірну уявну компоненту, і коли оператор є дисипативним з дискретним спектром. Показано, що нестационарність випадкового процесу тісно пов'язана з відхиленням оператора від свого спряженого. Використовуючи трикутну і універсальну моделі несамоспряжених операторів, можна отримати представлення для кореляційної функції у випадку нестационарного випадкового процесу, яке заміняє представлення Бохнера – Хінчина у випадку стаціонарних випадкових процесів. Отримано вираз для інфінітезимальної функції для різних випадків спектра (дискретний спектр, розташований в верхній напівплощині, і безконтрастний спектр в нулі). Для випадку оператора з дискретним спектром інфінітезимальна функція може бути знайдена через спеціальну лямбда-функцію. Для лебегового простору комплекснозначних інтегрованих з квадратом функцій отримано вираз для інфінітезимальної функції через спеціальну модифіковану функцію Бесселя нульового порядку. Показано, що аналогічний підхід можна використовувати для еволюційно представимих послідовностей в гільбертовому просторі.

Ключові слова: гільбертів простір, нестационарні випадкові процеси, кореляційна функція, інфінітезимальна функція, спряжений оператор, дисипативний оператор, спектр оператора, дискретний спектр, безконтрастний спектр.

Вступ. Розглянемо комплекснозначний процес $\xi(t)$ з $M\xi(t) \equiv 0$ і кореляційною функцією

$$K(t-s) = M\xi(t)\overline{\xi(s)}.$$

Кореляційна функція $K(t-s)$ задовольняє рівняння

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial s} = 0.$$

Це рівняння може бути покладено в основу виділення нових класів випадкових, у загальному випадку, нестационарних, процесів [1]. Стаціонарному випадковому процесу $\xi(t)$ відповідає крива ξ_t в гільбертовому просторі $H_\xi = \overline{V(\xi_k)}$ [2–4], причому

$$K(t, s) = M\xi(t)\overline{\xi(s)} = \langle \xi_t, \xi_s \rangle.$$

Таким чином, в рамках кореляційної теорії можна використовувати гільбертів підхід. Стаціонарному випадковому процесу відповідає крива в просторі H_ξ

$$\xi_t = e^{itA}\xi_0,$$

де A – самоспряжений, взагалі кажучи, необмежений оператор [2–4].

Стаціонарні випадкові процеси в гільбертовому просторі вивчались, починаючи з робіт А. Н. Колмогорова [5]. Гільбертів підхід був положений в основу побудування деяких класів нестационарних процесів в монографії М. С. Ліфшица і А. А. Янцевича [1] та інших працях [6–9]. Якщо розглянути рівняння для кореляційної функції $K(t, s)$ вигляду

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial s} = - \sum_{\alpha, \beta=1}^r \varphi_\alpha(t) I_{\alpha\beta} \overline{\varphi_\beta(s)},$$

де матриця I задовольняє умову

$$I = I^*, \frac{A - A^*}{i} = - \sum_{\alpha, \beta=1}^r \varphi_\alpha(t) I_{\alpha\beta} \overline{\varphi_\beta(s)},$$

і розглянути криві ξ_t в просторі H_ξ , які задовольняють рівняння

© Боева А. А., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПИ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПИ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



$$\frac{d\xi_t}{dt} = iA\xi_t, \quad W(t, s) = \frac{\partial^2 K}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 K}{\partial s^2}. \quad (1)$$

де вже $A \neq A^*$, то

$$-\left(\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial s}\right) = \langle 2 \operatorname{Im} A^* \xi_t, \xi_s \rangle.$$

Тобто нестационарність випадкового процесу тісно пов'язана з відхиленням оператора A від свого спряженого A^* [1]. Використовуючи трикутну і універсальну моделі несамоспряжених операторів, можна отримати представлення для $K(t, s)$ у випадку нестационарного випадкового процесу, яке заміняє представлення Бохнера – Хінчина у випадку стаціонарних випадкових процесів.

Мета і завдання статті. Надалі $K(t, s)$ передбачається неперервною, також існують частинні похідні першого і другого порядку. В роботі В. А. Золотарьова і А. А. Янцевица [6] було запропоновано моделювати ξ_t в H_ξ за допомогою рівняння

$$\frac{d\xi_t}{dt} = iA\xi_t,$$

де $A(t)$ – сімейство операторів. Якщо $K(t, s)$ задовольняє рівняння

$$\frac{\partial K}{\partial t} - \frac{\partial K}{\partial s} = 0,$$

то для $A(t)$ отримаємо операторне рівняння Ріккати:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A^2 = B, \quad A(0) = 0, \quad A = A^*.$$

Випадок, коли $A(t) = A$, тобто не залежить від t , не розглядався. Дана стаття як раз і присвячена цьому випадку, причому $A \neq A^*$, а $K(t, s)$ задовольняє рівняння

$$\frac{\partial^2 K}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 K}{\partial s^2} = -\left(\frac{A^{*2} - A^2}{i} \xi_t, \xi_s\right).$$

Якщо $K(t, s)$ може бути представлена у вигляді

$$K(t, s) = K_1(t+s) + K_2(t-s),$$

то

$$\frac{\partial^2 K}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 K}{\partial s^2} = 0;$$

у іншому випадку

$$\frac{\partial^2 K}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 K}{\partial s^2} \neq 0.$$

Введемо функцію

Назвемо $W(t, s)$ інфінітезимальною кореляційною функцією другого порядку. Надалі в якості ξ_t будемо розглядати еволюційно представлені криві ξ_t , які є розв'язками задачі Коші в гільбертовому просторі H_ξ [1, 9]

$$\frac{d\xi_t}{dt} = iA\xi_t, \quad \xi_t|_{t=0} = \xi_0. \quad (2)$$

Тобто $\xi_t = e^{itA}\xi_0$, де e^{itA} – операторна експонента, яка може бути представлена в інтегральному вигляді:

$$e^{itA}\xi_0 = -\frac{1}{2\pi i} \oint_\gamma e^{\lambda t} (A - \lambda I)^{-1} \xi_0 d\lambda. \quad (3)$$

Тут γ – замкнений контур, що охоплює спектр оператора A [1, 3, 4].

Для таких кривих

$$\begin{aligned} W(t, s) &= -i \left\langle \frac{A^2 - A^{*2}}{i} \xi_t, \xi_s \right\rangle = \\ &= -i \left\langle \left(A \frac{A - A^*}{i} + \frac{A - A^*}{i} A^* \right) \xi_t, \xi_s \right\rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо оператор A має одновимірну уявну компоненту [1], тобто

$$\frac{A - A^*}{i} = \langle ; g \rangle g, \quad (5)$$

де g – каналовий елемент оператора A [1], то

$$\begin{aligned} W(t, s) &= -\frac{1}{i} \langle [\langle \xi_t, Ag \rangle g + \langle \xi_t, g \rangle Ag], \xi_s \rangle = \\ &= -\frac{1}{i} \sum_{\alpha, \beta} I_{\alpha\beta} \varphi_\alpha(t) \overline{\varphi_\beta(s)}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $g_1 = g$; $g_2 = Ag$;

$$I_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} - \text{інволюція [1].}$$

Розглянемо спочатку випадок, коли g є власним вектором оператора A , тобто $Ag = \lambda g$. Тоді

$$W(t, s) = -2\beta_0 \varphi(t) \overline{\varphi(s)}, \quad (7)$$

де

$$\lambda_0 = \alpha_0 + i\beta_0, \quad \varphi(t) = \langle e^{itA} \xi_0, g \rangle.$$

Якщо A є дисипативним оператором з дискретним спектром [1], то

$$\varphi(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_{0k} \Lambda_k(t), \quad (8)$$

де

$$\Lambda_k = -\frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} \sqrt{2 \operatorname{Im} \lambda_k} \frac{1}{\lambda_k - \lambda} \prod_{j=1}^{k-1} \frac{\lambda_j - \lambda}{\lambda_j - \lambda} d\lambda$$

– так звана спеціальна Λ -функція [1].

Якщо $\{\lambda_j\}$ задовольняють умову [10]

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\operatorname{Im} \lambda_j \operatorname{Im} \lambda_k}{|\lambda_j - \lambda_k|} < \infty, \quad (9)$$

то $\varphi(e) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{i\lambda_k t}$.

Якщо $Ag \neq \lambda g$, то

$$\varphi_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_{0k} \Lambda_k(t),$$

а для $\varphi_2(t)$ маємо вираз

$$\varphi_2(t) = \langle e^{itA} \zeta_0, Ag \rangle = \langle \zeta_0, e^{itA^*} Ag \rangle.$$

Далі,

$$Ag = iA^*g + i \langle g, g \rangle g = iA^*g + \|g\|^2 g$$

(це співвідношення випливає з умови операторного вузла [1]),

$$\frac{A - A^*}{i} = \langle \cdot, g \rangle g.$$

Таким чином,

$$\begin{aligned} \varphi_2(t) &= \langle \zeta_0, e^{itA^*} (iA^*g + \|g\|^2 g) \rangle = \langle \zeta_0, e^{itA^*} iA^*g \rangle - \|g\|^2 \langle \zeta_0, e^{itA^*} g \rangle = \\ &= i \frac{d}{dt} \langle \zeta_0, e^{itA^*} g \rangle + i \|g\|^2 \langle \zeta_0, e^{itA^*} g \rangle. \end{aligned}$$

Отже,

$$\varphi_2(t) = \left(-i \frac{d}{dt} + i \|g\|^2 \right) \varphi_1(t) = \left(-i \frac{d}{dt} + i \|g\|^2 \right) \sum_{k=1}^{\infty} f_{0k} \Lambda_k(t),$$

якщо виконується умова (9).

Хай тепер $H_{\xi} = L^2_{[0,1]}$ [3, 4], а оператор A має вигляд

$$Af(x) = i \int_x^1 f(y) dy. \quad (10)$$

Тоді

$$Af^*(x) = -\int_0^x f(y) dy,$$

і

$$\frac{A - A^*}{i} f = \langle f, g \rangle_{L^2_{[0,1]}} g,$$

де $g \equiv 1$ [1].

У цьому випадку

$$\varphi_1(t) = \langle e^{itA} \zeta_0, g_1 \rangle = \int_0^t \zeta_0(y) I_0(2\sqrt{ty}) dy,$$

де $I_0(z)$ – модифікована функція Бесселя нульового порядку [1].

$$\begin{aligned} \varphi_2(t) &= \langle e^{itA} \zeta_0, g_2 \rangle = \langle \zeta_0, ie^{-itA^*} (x-l) g_2 \rangle_{L^2_{[0,1]}} = \\ &= -il \varphi_1(t) + i \langle \zeta_0, e^{-itA^*} x \rangle_{L^2_{[0,1]}} = -il \varphi_1(t) + i \varphi_2(t), \end{aligned}$$

де

$$\varphi_2(t) = \langle \zeta_0, e^{-itA^*} x \rangle.$$

Далі,

$$\begin{aligned} e^{-itA} x &= -\frac{1}{2\pi} \oint_{\gamma} e^{itA} (A^* - \lambda I)^{-1} x d\lambda, \\ &= \langle \cdot, e \rangle e + \langle U^*, e \rangle U^* e = \langle \cdot, g_1 \rangle g_1 + \langle \cdot, g_2 \rangle g_2, \end{aligned}$$

$$(A^* - \lambda I)^{-1} x = h(x, \lambda),$$

$$x = A^* h - \lambda h,$$

звідки

$$1 = -h(x, h) - \lambda h'(x, \lambda), \quad h(0) = 0.$$

Отже,

$$h(x, \lambda) = -\frac{1}{\lambda} \int_0^x e^{-\frac{1}{\lambda}(x-y)} dy \left| \frac{y}{\lambda} = u \right| = -e^{-\frac{i}{\lambda}x} \int_0^x e^{iu} du = -\frac{(1 - e^{-\frac{i}{\lambda}x})}{i}.$$

Тоді

$$e^{-itA^*} x = -\frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} -\frac{1}{i} e^{it\lambda} \left(1 - e^{-\frac{i}{\lambda}x} \right) d\lambda = -\frac{1}{2\pi i} \oint_{\gamma} e^{-(it\lambda + i\frac{x}{\lambda})} d\lambda.$$

Використовуючи теорію лишків, остаточно отримаємо:

$$e^{-itA^*} x = -I_0(\sqrt{2xt}).$$

Таким чином,

$$\varphi_2(t) = -\frac{1}{i} \int_0^t \zeta_0(y) I_0(2\sqrt{ty}) dy = -\frac{1}{i} \varphi_1(t).$$

Шляхи подальших досліджень. Використовуючи універсальні моделі дисипативних операторів, можна отримати подання для $W(t, s)$ у випадку, коли [11]

$$\dim \frac{A - A^*}{i} H = r < \infty.$$

Аналогічний підхід можна використовувати для еволюційно представимих нестационарних послідовностей в гільбертовому просторі, коли

$$\zeta_n = T^n \zeta_0,$$

де T – обмежений оператор, причому

$$\dim \overline{(I - T^*T)H} = r < \infty.$$

При цьому кореляційна різниця $W(n, m)$ визначається як

$$W(n, m) = K(n, m) - K(n + 2, m + 2) = \left\langle (I - T^{*2} T^2) \zeta_n, \zeta_m \right\rangle.$$

Якщо

$$I - T^*T = \langle \cdot, e \rangle e,$$

то

$$\begin{aligned} I - T^{*2} T^2 &= I - T^*T + T^*(I - T^*T)T = \\ &= \langle \cdot, e \rangle e + \langle U^* \cdot, e \rangle U^* e = \langle \cdot, g_1 \rangle g_1 + \langle \cdot, g_2 \rangle g_2, \end{aligned}$$

де

$$g_1 = e, \quad g_2 = U^* e.$$

Як і для випадкових процесів, кореляційна функція $K(n, m)$ визначається як скалярний добуток в просторі H_ξ :

$$K(m, n) = \langle \zeta_m, \zeta_n \rangle_{L^2_{[0,1]}}.$$

Тоді

$$W(n, m) = \Phi_1(n) \overline{\Phi_1(m)} + \Phi_2(n) \overline{\Phi_2(m)},$$

де

$$\Phi_1(n) = \langle \zeta_0, T^{*n} g \rangle,$$

$$\Phi_2(n) = \langle \zeta_0, T^{*(n+1)} g \rangle = \Phi_2(n+1).$$

Використовуючи трикутну і універсальні моделі операторів стиску, можна отримати подання $\Phi_1(n)$ для різних випадків спектра [7, 12].

Висновки. В роботі отримано вираз для інфінітезимальної функції для різних випадків спектра. Якщо A є дисипативним оператором з дискретним спектром, то функція $W(t, s)$ може бути виражена через спеціальну Λ -функцію. В гільбертовому просторі $L^2_{[0,1]}$ інфінітезимальна функція виражається через спеціальну модифіковану функцію Бесселя нульового порядку. Також розглядається можливість використання гільбертового підходу для еволюційно представимих послідовностей.

Автор виражає подяку проф. А. А. Янцевичу за постановку задачі, допомогу і консультації.

Список використаної літератури

1. Livshitz M. S., Yantsevich A. A. *Operator colligations in Hilbert spaces*. New-York: John Wiley and Sons, 1979. 226 p.
2. Ахизер Н. И., Глазман И. М. *Теория линейных операторов в гильбертовом пространстве*. Харьков: Вища школа, 1978. Т. 2. 288 с.
3. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Наука, 1968. 492 с.
4. Рисс Ф., Секефальви-Надь Б. *Лекции по функциональному анализу*. Москва: Мир, 1979. 587 с.
5. Kolmogorov A. N. Stationary sequences in Hilbert spaces. *Buyl. Mosk. Gos. Univ.* 1941. Vol. 2, no. 6. P. 1–40.
6. Золотарев В. А., Янцевич А. А. Нестационарные кривые в гильбертовом пространстве и нелинейные операторные уравнения. *Теория операторов субгармонических функций*. Киев: Наукова думка, 1991. С. 54–59.
7. Yantsevich A. A. Nonstationary sequences in Hilbert space. *Correlation Theory. Journal of Soviet Mathematics*. 1990. Vol. 48, no. 4. P. 440–443.
8. Yantsevich A. A. The application of operator colligations to the investigation of nonstationary random processes and sequences. *Materials of the All-Union Symposium on Random Processes*. Kyiv, 1973. P. 229–232.
9. Петрова А. Ю. Корреляционная теория некоторых классов случайных функций конечного ранга нестационарности. *Радиоэлектроника и информатика*. 2007. № 1. С. 67–71.
10. Кацнельсон В. Э. Об условиях базисности системы корневых векторов некоторых классов операторов. *Функциональный анализ и его приложения*. 1967. Т. 1, вып. 2. С. 39–51.
11. Hatamleh R. On a class of nonhomogeneous fields in Hilbert space. *Journal of Mathematics and Statistics*. 2007. Vol. 3, no. 4. P. 207–210.
12. Золотарев В. А. *Аналитические методы спектральных представлений несамосопряженных и неунитарных операторов*. Харьков: Изд-во ХНУ, 2003. 342 с.

References (transliterated)

1. Livshitz M. S., Yantsevich A. A. *Operator colligations in Hilbert spaces*. New-York, John Wiley and Sons, 1979. 226 p.
2. Akhiezer N. I., Glazman I. M. *Teoriya lineynykh operatorov v gil'bertovom prostranstve* [The theory of linear operators in Hilbert space]. Kharkov, Vischa Shkola Publ., 1978, vol. 2. 300 p.
3. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teoriiy funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of function theory and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 492 p.
4. Riesz F., Sz. – Nagy B. *Functional analysis*. 6th Revised ed. Budapest, 1972, 587 p. (Russ. ed.: Riesz F., Sz. – Nagy B. *Lektsii po funktsional'nomu analizu*. Moscow, Mir Publ., 1979. 587 p.).
5. Kolmogorov A. N. Stationary sequences in Hilbert spaces. *Buyl. Mosk. Gos. Univ.* 1941, vol. 2, no. 6, pp. 1–40.
6. Zolotarev V. A., Yantsevich A. A. Nestatsionarnyye krivyye v gil'bertovom prostranstve i nelineynyye operatornyye uravneniya [The nonstationary curves in Hilbert space and nonlinear operator equations]. *Teoriya operatorov subgarmonicheskikh funktsiy* [The theory of the operators of subharmonic functions]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1991, pp. 54–59.
7. Yantsevich A. A. Nonstationary sequences in Hilbert space. *Correlation Theory. Journal of Soviet Mathematics*. 1990, vol. 48, no. 4, pp. 440–443.
8. Yantsevich A. A. The application of operator colligations to the investigation of nonstationary random processes and sequences. *Materials of the All-Union Symposium on Random Processes*. Kyiv, 1973, pp. 229–232.
9. Petrova A. Yu. Korrelyatsionnaya teoriya nekotorykh klassov sluchaynykh funktsiy konechnogo ranga nestatsionarnosti [The correlation theory of some classes of functions of final rank of nonstationarity]. *Radioelektronika i Informatika*. 2007, vol. 1, pp. 67–71.
10. Katsnelson V. E. Ob usloviyakh bazisnosti sistemy kornevykh vektorov nekotorykh klassov operatorov [On the base conditions of the system root vectors of some classes of operators]. *Funktsional'nyy analiz i yego prilozheniya*. 1967, vol. 1, issue 2, pp. 39–51.

11. Hatamleh R. On a class of nonhomogeneous fields in Hilbert space. *Journal of Mathematics and Statistics*. 2007, vol. 3, no. 1, pp. 207–210. methods of spectral representation of nonselfadjoint and nonunitary operators]. Kharkov, KhNU Publ., 2003, 342 p.
12. Zolotarev V. A. *Analiticheskiye metody spektral'nykh predstavleniy nesamosopryadzennykh i neunitarnykh operatorov* [The analytical *Надійшла (received) 09.11.2023*

UDC 513.88

A. A. BOEVA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine; e-mail: annaboeva19@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-3355-8460H>

ON A CLASS OF NONSTATIONARY CURVES IN HILBERT SPACE

Stationary random processes have been studied quite well over recent years starting with the works of A. N. Kolmogorov. The possibility of building nonstationary random process correlation theory was considered in the monographs by M. S. Livshits, A. A. Yantsevich, V. A. Zolotarev and others. Some classes of nonstationary curves were investigated by V. E. Katsnelson. In this paper nonstationary random processes are represented as curves in Hilbert space which "slightly deviate" from random processes with the correlation function of special kind. The infinitesimal correlation function has been introduced; in essence, this function characterizes the deviation from the correlation process with the given correlation function. The paper discusses the cases of nonstationary random processes, the operator of which has one-dimensional imaginary component. Cases of a dissipative operator with discrete spectrum are also considered in this work. It is shown that the nonstationarity of the random process is closely related to the deviation of the operator from its conjugated operator. Using the triangle and universal models of non-self-adjoint operators it is possible to obtain the representation for the correlation function in the case of nonstationary process which replaces the Bochner – Khinchin representation for stationary random processes. The expression for the infinitesimal correlation function was obtained for different cases of operator spectrum: for the discrete spectrum placed in the upper half-plane and for the contrast-free spectrum at zero. In the case of dissipative operator with discrete spectrum the infinitesimal function can be found in terms of special lambda function. For Lebesgue spaces of complex-valued squared integrable functions the expression of infinitesimal function was found in terms of special zero order modified Bessel function. It was shown that a similar approach can be applied for the evolutionarily represented sequences in Hilbert spaces.

Keywords: Hilbert space, nonstationary random processes, correlational function, infinitesimal function, conjugate operator, dissipative operator, operator spectrum, dissipative spectrum, contrast-free spectrum.

Повні імена авторів / Author's full name

Автор 1 / Author 1: Боева Анна Анатоліївна, Boeva Anna Anatoliivna

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	3
<i>Павлов О. А., Кисельов М. Є.</i> Математичні моделі та методи узгодженого планування	3
<i>Gobov D. A., Zuieva O. V.</i> Examining software quality concept: business analysis perspective	9
УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ	15
<i>Yagup K. V., Yagup V. G.</i> Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system	15
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	21
<i>Москаленко В. В., Матвієнко А. О., Фонта Н. Г.</i> Дослідження та проектування архітектури Marketing Cloud Salesforce CRM в залежності від маркетингової стратегії компанії	21
<i>Мельников О. С.</i> Оптимізація тривалості аукціонів при наявності часових витрат	31
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Olkhoviy O. M.</i> Blockchain platform selection and software development for decentralized exchange of business process models.....	36
<i>Yamburenko V. V., Liutenko I. V., Kopp A. M., Holovnia D. M.</i> Algorithm and software of medical personnel selection system.....	46
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	53
<i>Мазманішвілі О. С., Сидоренко Г. Ю.</i> Моделювання поширення плоскої електромагнітної хвилі у неоднорідному непоглинаючому середовищі	53
<i>Ахїєзер О. Б., Тоница О. В., Геляровська О. А., Сердюк І. В., Асландуков М. О.</i> Дослідженні демографічних ситуацій на базі лагових моделей	60
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	67
<i>Клятченко Я. М., Голуб В. В.</i> Ефективність модифікації алгоритму ущільнення даних без втрат	67
<i>Dremov A. K.</i> Methods and means to improve the efficiency of network traffic security monitoring based on artificial intelligence	73
<i>Nikulina O. M., Khatsko K. O.</i> Method of converting the monolithic architecture of a front-end application to microfrontends	79
<i>Zacheplyo M. O., Yushchenko O. H.</i> The scientific basis, some results, and perspectives of modeling evolutionarily conditioned noogenesis of artificial creatures in virtual biocenoses.....	85
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Метод можливісного оцінювання пояснення в системі штучного інтелекту	95
ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА.....	102
<i>Боєва А. А.</i> Про один клас нестационарних кривих в гільбертовому просторі.....	102

CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY	3
<i>Pavlov A. A., Kyselov M. Y.</i> Mathematical models and methods of coordinated planning	3
<i>Gobov D. A., Zuieva O. V.</i> Examining software quality concept: business analysis perspective	9
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS	15
<i>Yagup K. V., Yagup V. G.</i> Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system	15
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....	21
<i>Moskalenko V. V., Matvienko A. O., Fonta N. G.</i> Research and design of the Marketing Cloud Salesforce CRM architecture depending on the company's marketing strategy	21
<i>Melnikov O. S.</i> Optimization of the auction duration in the presense of time-dependant costs	31
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Olkhoviy O. M.</i> Blockchain platform selection and software development for decentralized exchange of business process models.....	36
<i>Yamburenko V. V., Liutenko I. V., Kopp A. M., Holovnia D. M.</i> Algorithm and software of medical personnel selection system.....	46
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING	53
<i>Mazmanishvili O. S., Sydorenko G. Yu.</i> Simulation of the propagation of a plane electromagnetic wave in an inhomogeneous nonabsorbing medium	53
<i>Ahiezher O. B., Tonitsa O. V., Gelyarovska O. A., Serdyuk I. V., Aslanukov M. O.</i> Advanced demographic situations based on lag models	60
INFORMATION TECHNOLOGY.....	67
<i>Klyatchenko Y. M., Holub V. V.</i> Efficiency of lossless data compression algorithm modification.....	67
<i>Dremov A. K.</i> Methods and means to improve the efficiency of network traffic security monitoring based on artificial intelligence	73
<i>Nikulina O. M., Khatsko K. O.</i> Method of converting the monolithic architecture of a front-end application to microfrontends	79
<i>Zacheplyo M. O., Yushchenko O. H.</i> The scientific basis, some results, and perspectives of modeling evolutionarily conditioned noogenesis of artificial creatures in virtual biocenoses.....	85
<i>Chalyi S. F., Leshchynskiy V. O.</i> A method for evaluating explanations in an artificial intelligence system using possibility theory	95
APPLIED MATHEMATICS	102
<i>Boeva A. A.</i> On a class of nonstationary curves in Hilbert space.....	102

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 2 (10) 2023

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 27.12.2023 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. 9,5. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 100 пр. Зам. № 312. Ціна договірна.

Видавництво «Стильна типографія»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 5493 від 22.08.2017 р.
61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28А, тел. (057) 754-49-42; e-mail: zebraprint.zakaz@gmail.com